

Elvira Nicolini



IL COMFORT INDOOR NEL PATRIMONIO EDILIZIO ESISTENTE

Tecnologie e metodi per gli ambienti di vita

La scuola di Pitagora

5 | **Rehabilitation, Maintenance and Innovation of the Built Environment**
Recupero, manutenzione e innovazione dell'ambiente costruito

The series addresses the issue of rehabilitation and management of the built environment, in relation to the ongoing evolution of the needs of life. The need to develop methodologies and tools for the protection of identity and the control of the quality of use requires the coordination of multiple disciplinary contributions, engaged in the search for a dialectical relationship between conservation and transformation. In the design process, the identification of constraints that the built environment opposes to changes allows to protect the cultural identity, safeguarding the meaning and the role of evidence of the evolution of society and its tangible culture. The project is conceived as a means of governance of the processes of adaptation of the existing heritage to new needs arising from the evolution of the urban settlements, through strategies of protection, organisation, and management of resources. It is an iterative path, in which the decision-making phases are constantly guided by information, aimed at identifying intervention solutions whose outcome can be verified in the subsequent decision-making phases. The books published present the results of research, surveys, and projects, with the aim of promoting the scientific dissemination at national and international level.

The volumes published in the series are subject to double-blind peer review.

SCIENTIFIC COMMITTEE

Stefania De Medici – Struttura Didattica Speciale di Architettura, Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università degli Studi di Catania, Siracusa, Italy (Scientific Committee Chair)

Rogério Amoêda – School of Architecture and Arts, Lusíada University, Porto, Portugal

Roberto Bobbio – Dipartimento di Scienze per l'Architettura, Università degli Studi di Genova, Genova, Italy

Daniela Bosia – Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, Torino, Italy

María Lourdes Gutiérrez Carrillo – Departamento Construcciones Arquitectónicas Universidad de Granada, Granada, Spain

Gabriella Caterina – Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli "Federico II", Napoli, Italy

Donatella Diano – Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli "Federico II", Napoli, Italy

Pasquale De Toro – Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli "Federico II", Napoli, Italy

Katia Fabbricatti – Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli "Federico II", Napoli, Italy

Vittorio Fiore – Dipartimento di Scienze Umanistiche, Università degli Studi di Catania, Catania, Italy

Maria Cristina Forlani – Dipartimento di Architettura, Università degli Studi "G. d'Annunzio", Chieti-Pescara, Italy

Giovanna Franco – Dipartimento di Scienze per l'Architettura, Università degli Studi di Genova, Genova, Italy

Antonella Mami – Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Palermo, Palermo, Italy

Elvira Nicolini – Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Palermo, Palermo, Italy

Stefania Oppido – CNR, Istituto di Ricerca su Innovazione e Servizi per lo Sviluppo, Napoli, Italy

Maria Rita Pinto – Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli "Federico II", Napoli, Italy

Donatella Radogna – Dipartimento di Architettura, Università degli Studi "G. d'Annunzio", Chieti-Pescara, Italy

Zain ul Abedin – COMSAT Institute of Information Technology, Islamabad, Pakistan

† **Serena Viola** – Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli "Federico II", Napoli, Italy

Maria Rosaria Vitale – Struttura Didattica Speciale di Architettura di Siracusa, Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università degli Studi di Catania, Siracusa, Italy

Elvira Nicolini

**IL COMFORT INDOOR
NEL PATRIMONIO EDILIZIO ESISTENTE**

Tecnologie e metodi per gli ambienti di vita

La scuola di Pitagora editrice

Ai miei figli Aurora e Guglielmo

© Copyright 2022 La scuola di Pitagora editrice
Via Monte di Dio, 14
80132 Napoli
Tel.-Fax +39 081 7646814
www.scuoladipitagora.it
info@scuoladipitagora.it

Cover photograph: © Elvira Nicolini, GSW Headquarters, Berlin

Reproduction, copy or photocopies, transmission or translation of this publication, in any form and by any means, is prohibited without written permission of the publisher

ISBN 978-88-6542-871-9

This book, available as PDF on website www.scuoladipitagora.it, has been printed on demand
Printed in Italy

Table of contents

11	Introduzione
19	Parte I. L'edificio salubre e confortevole
21	1. Modelli energetici per il comfort indoor nel patrimonio costruito
25	2. Influenza dei parametri ambientali indoor nella conservazione degli edifici
27	3. Progressiva transizione da green building a healthy building
32	4. Edificio "malato". Fattori di discomfort
33	4.1 Discomfort relativo alla qualità dell'aria
35	4.2 Discomfort relativo a fattori microclimatici
37	4.3 Discomfort relativo ai livelli di rumorosità
38	4.4 Discomfort relativo a fattori di luminosità e abbagliamento

45	Parte II
	Il comfort indoor nel patrimonio costruito. Processi legislativi valutativi
47	1. Standardizzazione per la valutazione del comfort indoor nel patrimonio costruito
49	1.1 Indirizzi internazionali
50	1.1.1 Standard internazionali
54	1.1.2 Standard americani
56	1.2 Panorama legislativo europeo e italiano
58	1.2.1 Riferimenti legislativi inerenti al comfort termoigrometrico
60	1.2.2 Riferimenti legislativi inerenti alla qualità dell'aria
62	1.2.3 Riferimenti legislativi inerenti al comfort visivo
64	1.2.4 Riferimenti legislativi inerenti al comfort acustico
65	1.3 Recepimento italiano delle Direttive europee EPDB
79	2. Certificazioni di qualità e comfort indoor per il patrimonio costruito
81	2.1 La IEQ certificata da WELL
89	2.2 La IEQ certificata da LEED
93	2.3 La IEQ certificata da BREEAM
98	2.4 I criteri di Baukultur vs gli strumenti di valutazione
109	3. Metodi di valutazione del comfort indoor nel patrimonio costruito
111	3.1 Metodi di valutazione del comfort termoigrometrico
112	3.1.1 Modello stazionario
114	3.1.2 Modello adattivo
115	3.1.3 Diagrammi bioclimatici
117	3.1.4 Altri metodi di valutazione dello stress termico
118	3.2 Metodi di valutazione della qualità dell'aria
123	3.3 Metodi di valutazione del comfort visivo
125	3.4 Metodi di valutazione del comfort acustico
135	4. Parametri e strumenti per la misurazione del comfort indoor
137	4.1 Parametri e strumenti per la misura del comfort termoigrometrico
137	4.1.1 Temperatura dell'aria

139	4.1.2	Temperatura media radiante
140	4.1.3	Temperatura radiante piana
140	4.1.4	Temperatura superficiale
142	4.1.5	Umidità assoluta e relativa
143	4.1.6	Velocità dell'aria
144	4.1.7	Irraggiamento
145	4.2	Parametri e strumenti per la misura del comfort visivo
146	4.3	Parametri e strumenti per la misura del comfort acustico
147	4.4	Parametri e strumenti per la misura della qualità dell'aria
149	4.5	Strumenti multifunzione

157 Parte III

Il comfort indoor nel patrimonio costruito. Tecnologie

159	1.	Soluzioni per il miglioramento del comfort indoor nella storia dell'architettura
161	1.1	Tecnologie per il raffrescamento passivo
161	1.1.1	Raffrescamento ventilativo
162	1.1.2	Il raffrescamento geotermico
166	1.1.3	Il raffrescamento evaporativo
169	1.1.4	I sistemi di protezione dalla radiazione solare
171	1.2	Adattamento climatico degli edifici storici
171	1.2.1	Tipologie abitative nell'antichità
174	1.2.2	Esempi di tecnologie storiche per il controllo climatico
180	1.2.3	Elementi bioclimatici nei trattati
181	1.3	Il comfort indoor nell'architettura del Movimento Moderno
187	1.4	Il comfort indoor nell'architettura contemporanea
187	1.4.1	Sistemi passivi di ventilazione
190	1.4.2	Soluzioni integrate nell'involucro edilizio
194	1.4.3	Sistemi di protezione dalla radiazione solare
205	2.	Soluzioni Nature-based integrate negli edifici esistenti

207	2.1 Benefici per il comfort termoigrometrico
212	2.2 Benefici per la qualità dell'aria
215	2.3 Benefici per il comfort acustico
218	2.4 Benefici per il comfort visivo
219	2.5 Soluzioni tecnologiche
222	2.5.1 Sistemi di vegetazione orizzontale integrata
228	2.5.2 Sistemi di vegetazione verticale integrata
245	3. Elementi e materiali bio-based per il comfort indoor degli edifici esistenti
247	3.1 Contributo dei prodotti da costruzione sulla qualità dell'aria
249	3.2 Valutazione dell'emissività e limiti di emissione dei prodotti da costruzione
253	3.3 Processi ed etichette per la certificazione e la commercializzazione dei prodotti bio-based
257	3.4 Buone pratiche in atto e sperimentali sui prodotti bio-based per l'edilizia
258	3.4.1 Pannelli bio-compositi
262	3.4.2 Malte e intonaci a base biologica
265	3.4.3 Materiali strutturali a base biologica
275	4. Tecnologia domotica per il comfort indoor nel patrimonio costruito
277	4.1 Normativa di riferimento
280	4.2 Tecnologie domotiche per la gestione automatica del sistema edilizio
286	4.3 Sperimentazioni sulle tecnologie domotiche in ausilio al confort indoor degli edifici esistenti
295	Parte IV
	Il comfort indoor nel patrimonio costruito. Casi studio
297	Effetti del nuovo sistema di copertura sul microclima della Villa del Casale di PiazzaArmerina (Enna) per migliorare le condizioni di conservazione e il comfort dei visitatori Alberghina M. F., Nicolini E., Prestileo F., Schiavone S.

299	1. Introduzione
300	2. L'intervento di sostituzione e i nuovi materiali del sistema di copertura
302	3. Metodologia di indagine e obiettivi del monitoraggio microclimatico
306	4. Risultati del monitoraggio microclimatico dopo gli interventi conservativi
312	5. Conclusioni
317	Verifica della prestazione di isolamento termico di una parete ventilata con muro verde anche durante condizioni climatiche altamente soleggiate, ventose e piovose Nicolini E.
318	1. Introduzione
319	2. Discussione
319	2.1 Dati di partenza
322	2.2 Elaborazione dei dati
331	3. Risultati
333	4. Conclusioni
337	Il cocchiopesto per il miglioramento microclimatico negli edifici residenziali: il monitoraggio del caso studio in Pianura Padana Rosso M., Agostinelli S.
339	1. Introduzione
341	2. Caratteristiche delle malte
342	3. Sperimentazione
346	4. Monitoraggio invernale 2022
347	5. Monitoraggio estivo 2022
348	6. Conclusioni
351	Monitoraggio microclimatico nel Museo della Città e del Territorio di Narni (Terni): esigenze di fruizione ed aspetti di conservazione di dipinti su tavola Pelosi C., Lanteri L., Blanco B.
353	1. Introduzione

- 355** 2. Caso studio: il Museo di Palazzo Erola a Narni
- 357** 3. Sperimentazione
- 357** 4. Risultati e discussione
- 364** 5. Conclusioni

367 Conclusione

Introduzione

Tra gli obiettivi previsti dall'Agenda 2030 è ricorrente una visione olistica mirata alla salute umana che indirizza la progettazione del costruito verso un approccio "Human Centred" fondato sulle esigenze dell'utente. Un'architettura, le cui prestazioni riescono pienamente a soddisfare tali esigenze, mantenendo nel tempo alti i livelli di comfort e di salute dell'utente, può definirsi di qualità. L'attenzione al comfort, in particolare quello indoor, non è recente ma ha visto un crescente interesse che oggi è corrente in un quadro normativo edilizio internazionale. Si ricorda come la connessione edificio-salute sia stata discussa quando l'Organizzazione Mondiale della Sanità coniò il termine della "Sindrome da Sick Building (SBS)", addebitando un disagio sensoriale degli utenti a composti chimici presenti nell'aria indoor e nei materiali posti in opera. In

conseguenza, l'ASHRAE codificò lo standard IAQ (Indoor Air Quality), determinando un accettabile livello di anidride carbonica e un efficiente sistema di ricambio d'aria. La Direttiva europea in materia di prestazione energetica degli edifici (EPBD 2018/844) riconosce il concetto di "clima degli ambienti interni"; la norma europea UNI EN16798:2019 specifica i requisiti minimi per la progettazione e la valutazione dei parametri ambientali interni riferiti al comfort termo-igrometrico, alla qualità dell'aria, al comfort visivo e acustico, indirizzando la misura dell'IEQ (Indoor Environmental Quality) in funzione di fattori di discomfort locale (corrente d'aria, asimmetria della temperatura radiante, differenze della temperatura dell'aria verticale, temperatura della superficie del pavimento, ecc.).

La valutazione dell'IEQ è, però, complessa

a causa dei caratteri immateriali (psicologici) e materiali (fisici e ambientali) coinvolti. Dunque, agli attuali riferimenti legislativi, che propongono un approccio valutativo di carattere oggettivo con parametri misurabili, andrebbe affiancato un metodo che acquisisca e valuti la percezione dell'ambiente da parte degli utenti. Non esiste un metodo univoco e standardizzato, ma quest'ultimo aspetto è in parte intrinseco in alcune recenti norme tecniche e in pochi sistemi di certificazione dell'efficienza energetica e della sostenibilità ambientale degli edifici. La maggior parte degli standard energetici regolamentati e relativi all'IEQ, infatti, si riferiscono all'efficienza di nuovi edifici.

Capire come adattare tali disposizioni agli edifici esistenti si rivela una sfida in relazione all'esigenza di conservarne il valore storico-culturale e ai vincoli in essere sulle preesistenze che possono ostacolare del tutto o in parte l'intervento di recupero. In vero, la tradizione della tecnologia dell'architettura e la progettazione tecnologica hanno da sempre messo l'utente e le relazioni con l'ambiente al centro di analisi e progetto. L'architettura tradizionale ha in sé delle caratteristiche prestazionali, esito di consolidate pratiche costruttive tradizionali, che in molti casi riescono a garantire buoni livelli in termini di acustica e inerzia termica, garantendo un adeguato comfort indoor. Anche se ancora oggi contemplato solo in parte, attribuire il concetto di sostenibilità ad un'architettura esistente, nel caso di costruito storico, è un'operazione naturale, poiché in assenza di tecnologie, le esigenze dell'uomo erano ottemperate mediante particolari espedienti costruttivi affinati nel corso dei secoli,

che includevano, ad esempio, l'attenzione alle caratteristiche dell'apparecchiatura muraria e la sperimentazione di sistemi di ventilazione naturale. Il rispetto dell'ambiente era, inoltre, garantito con l'adattamento alla morfologia del contesto e l'uso di materiali locali. Per l'edilizia del secondo dopoguerra, patrimonio edilizio più diffuso, la questione diviene più complessa per la scarsa qualità architettonica adducibile sia all'assenza di normativa che potesse orientare alla configurazione di un ambiente indoor con buoni livelli di comfort, che all'assenza della cultura tecnologica che si era sedimentata nel tempo e che nella rapidità del fenomeno di urbanizzazione si è perduta. Riconsiderare, con carattere innovativo, la modalità di vivere l'ambiente indoor è una priorità immaginabile a diverse scale: il miglioramento dell'IEQ è una questione "Human Centred", parte dall'esigenze di salute e benessere dei fruitori, ma può anche contribuire considerevolmente al conseguimento degli obiettivi comunitari di sviluppo sostenibile. Ciò se pensato per un'architettura esistente, nel raggiungimento di tali obiettivi, ha ancor più valenza, non solo per l'esigua parte che proporzionalmente è rappresentata dal nuovo edificato, ma anche per i concetti di sostenibilità che racchiude in sé l'azione di recupero di tali manufatti edilizi. Qualsiasi costruzione esistente, nella sua unica espressione, rappresenta un bene irriproducibile e si configura sempre come una risorsa riutilizzabile che evita il consumo di nuovo suolo, materiali, energia, trasporti e altro.

Il presente volume è l'esito di una ricerca ad ampio raggio sull'applicazione dell'IEQ nell'edilizia esistente. Dopo una prima definizione,

nella parte 1, del significato di edificio “Healthy” (salubre e confortevole) si indaga l’importanza dei parametri ambientali in riferimento ai livelli di benessere necessari per garantire un’adeguata vivibilità degli ambienti interni; in seguito, il volume si sviluppa in altre tre parti che osservano il comfort indoor negli edifici esistenti da più punti di vista. Una seconda analisi riguarda gli indirizzi legislativi europei e nazionali, con particolare riferimento ai fattori che possono influire il benessere dell’utente nel proprio ambiente di vita. Sono, inoltre, confrontati i più comuni sistemi di valutazione multicriteri finalizzati al conseguimento delle certificazioni ambientali degli edifici, selezionando i protocolli specifici per l’edilizia esistente, LEED, BREEAM con il protocollo di certificazione WELL, strumento appositamente studiato per verificare e certificare il livello di salubrità e di benessere di chi vive negli ambienti costruiti.

La valutazione del comfort indoor mediante certificazione volontaria non può prescindere in tutti i casi da un’attenta indagine, prevista, peraltro, dalle norme tecniche armonizzate europee. Si approfondiscono, dunque, per il comfort termoigrometro, visivo, acustico e qualità dell’aria i metodi di valutazione previsti dagli strumenti vigenti, completando le informazioni con la descrizione dei più innovativi strumenti di misurazione.

La terza parte analizza lo stato dell’arte sugli aspetti tecnologici dell’architettura finalizzati all’ottenimento di un ambiente salubre e confortevole. Lo studio segue un ordine cronologico a partire dai sistemi più antichi e che ancora oggi, rivisitati, si confermano efficaci soluzioni

di controllo del comfort indoor. Nel corso della storia, infatti, si può osservare come i sistemi passivi che ricreano un ambiente confortevole all’interno (raffrescamento evaporativo, calore e raffrescamento geotermico, illuminazione controllata, ventilazione naturale) siano, seppur con specifiche differenti, concettualmente simili nel tempo, nei luoghi e nelle culture.

Lo studio volge fino ai giorni nostri esaminando le tecnologie relative al comfort indoor più innovative e le tecniche passive adattabili; tra queste si approfondiscono le soluzioni nature-based, che ancora non sono definite da una standardizzazione normativa ma sono note alla comunità scientifica per i benefici che inducono sul comfort dell’individuo a livello fisico e psichico. Un altro aspetto che influisce fortemente il comfort indoor è la qualità dell’aria e in relazione agli edifici esistenti, l’emissività dei materiali da costruzione. A tal riguardo, il volume esamina lo stato dell’arte sulle sperimentazioni in atto e i relativi benefici sul comfort indoor dei materiali bio-based, realizzati intenzionalmente da sostanze naturali, organiche, salubri nei confronti dell’uomo. Per concludere la terza parte, si analizzano le tecnologie emergenti di automazione dell’edificio, soluzioni di ausilio all’utente nel suo ambiente di vita, con focus sulle potenzialità legate al comfort indoor.

Il volume, infine, raccoglie buone pratiche e casi studio che riguardano interventi migliorativi il comfort indoor in edifici esistenti. Si tratta di soluzioni che il volume tratta nelle sue parti precedenti: analisi prestazionale di un sistema passivo di ventilazione con parte ventilata e camino di ventilazione in copertura; analisi prestazionale

di una parete verde; analisi prestazionale di un termointonaco bio-based; sperimentazione di un metodo di monitoraggio del microclima indoor. Gli esempi sono tutti riferiti a contesti esistenti di diversa destinazione d'uso (sito archeologi-

co, museo, abitazione, centro universitario) e si configurano soluzioni metodologicamente significative e utili poiché attuali e reiterabili in contesti similari.

Introduction

The goals of the 2030 Agenda often underlie a holistic vision aimed at human health, orienting the design of the built environment toward a "Human-Centered" approach, based on real user needs. Architectural quality can be achieved through the complete fulfillment of user needs by building performances, while keeping high levels of user comfort and health. The focus on comfort – especially indoor comfort – is not so recent; instead, it has been involved by a rising interest, which is now stable in the international legislative framework on building constructions. It can be recalled that the connections between buildings and health was discussed when the World Health Organization coined the term "Sick Building Syndrome (SBS)", blaming chemical compounds in indoor air and building materials for users' sensorial discomfort. As a consequence, ASHRAE codified the IAQ (Indoor Air Quality) standard, establishing the acceptable level of carbon anhydride and the characteristics of an efficient air exchange system. The European Directive on the Building Performance of Buildings (EPBD 2018/844) has adopted the concept of "indoor

climate"; the European code UNI EN 16798:2019 has specified the minimum requirement for the design and assessment of indoor environmental parameters for thermo-hygrometric comfort, air quality, and visual and acoustic comfort, defining the measurement of IEQ (Indoor Environmental Quality) as a product of local discomfort factors (air currents, radiant asymmetry, vertical thermal gradient, floor temperature, etc.).

However, IEQ assessment is a complex issue, due to the involvement of both immaterial (psychological) and material (physical and environmental) aspects. Hence, the current legislative frameworks, which propose an objective assessment approach, should be accompanied by a method that surveys and evaluates users' environmental perception. There is not a univocal and standardized method, but this aspect is partially intrinsic in some recent technical codes, and in some building certification systems related to energy efficiency and environmental sustainability. In fact, most of the legislative energy standards related to IEQ are focused on the efficiency of new constructions. Understanding how to adapt these provisions to existing buildings results to be a challenge, as it is combined with the need to preserve its

historical-cultural value and with the existing constraints on existing buildings, which may be a total or partial obstacle for restoration interventions. Actually, in the tradition of architectural technology and technological design, users have always been at the center of analyses and design. The performances of traditional architecture, which derive from consolidated traditional construction practices, can in many cases allow good levels of acoustics and thermal inertia, guaranteeing adequate indoor comfort. Nowadays, attributing the concept of sustainability to an existing building is mostly unimaginable; however, it is a natural operation for historical buildings, as in absence of technologies, human needs were fulfilled through particular construction expedients, fine-tuned across centuries: these include, for example, a focus on the characteristics of wall structures and the experimentation with natural ventilation system; respect for the environment was guaranteed through the adaptation to the morphology of the context and the use of local materials.

In the second post-war building constructions – the most diffuse building heritage – the issue is more complex, due to its low architectural quality. Two are the causes behind this: the absence of regulations to guide the design of indoor environments with good comfort levels, and the disappearance of technological culture, which had set over time, due to the rapidity of urbanization at that time. In any case, any existing construction, in its expression, represents an irreproducible good and a reusable resource, which can avoid the consumption of new land, materials, energy, transportation, and more.

Innovatively rethinking the ways of living in in-

door environments is now a priority and can be developed at different scales: IEQ improvement is a “Human-Centered” issue, as it expresses users’ needs for health and well-being, but can also considerably contribute to the fulfillment of Community goals of sustainable development. Achieving these goals in an existing building is even more meaningful, both since new constructions are only a small share, and for the concepts of sustainability embodied by the recovery of these buildings.

The current volume is the result of wide-scope research on the application of IEQ to existing buildings. Following the preliminary definition of the meaning of “Healthy” (salubrious and comfortable) buildings, this volume examines the importance of environmental parameters for the levels of well-being needed to ensure adequate livability in indoor environments; then, the volume is developed in three more parts that focus on the indoor comfort of existing buildings from various standpoints. Afterward, an analysis is performed on European and Italian legislative frameworks concerning the factors influencing users’ well-being in the living environment. A comparison is also provided between the most common multicriteria evaluation systems aimed at the achievement of building environmental certifications, selecting the specific protocols for existing buildings – LEED and BREEAM – and the certification protocol WELL, a tool specifically developed to study and certify the level of salubrity and well-being of those who live in the built environment.

However, the assessment of indoor comfort through voluntary certification cannot prescind from a detailed analysis, which is also prescribed by

harmonized European technical codes. Hence, this section also provides an in-depth examination of all the assessment methods for thermo-hygrometric, visual, and acoustic comfort, and air quality, considered by the existing normative tools, completing this information with the description of the most innovative measurement tools.

The third part analyzes the state of the art in architectural and technological aspects for the obtainment of salubrious and comfortable indoor environments. The study is presented in chronological order, starting from the most ancient systems, which still prove to be effective solutions for indoor environmental control. Over the course of history, similar passive systems for indoor comfort (evaporative cooling, geothermal heating/cooling, controlled illumination, and natural ventilation) have been created by different cultures and in different places, yet with different specifications. The study has been carried out until the present day, with the analysis of the most innovative indoor comfort technologies and adaptable passive techniques; among these, nature-based solutions are subjected to in-depth analysis. These have not received yet legislative standardization, but they are well-known to the scientific community for their physical and psychological benefits on

human comfort. Air quality, too, has a huge influence on indoor comfort, together with building material emissivity for existing buildings. On this topic, the volume examines the state of the art in ongoing experimentations, and the related benefits of bio-based materials on indoor comfort: these are intentionally realized from natural and organic substances, with a salubrious impact on people. The section is concluded by an analysis of emerging building automation techniques, which support users in their living environments, with a focus on their potential for indoor comfort. Finally, the volume collects good practices and case studies on indoor comfort improvement interventions in existing buildings. The theoretical base of these solutions is discussed in the previous parts of the volume: performance analysis of a passive ventilation system with a ventilated wall and ventilation chimney; performance analysis of a green wall; performance analysis of bio-based thermal plaster; experimentation of a monitoring method for indoor microclimate. The examples are related to existing buildings with different in-use destinations (archaeological site, museum, house, university center) and represent methodologically significant and useful solutions as they are current and can be repeated in similar contexts.

Ringraziamenti

La ricerca è stata finanziata Ministero Italiano dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca mediante il Progetto PON "Ricerca e Innovazione 2014-2020", linea 1 "Mobilità ricercatori" con il

D.D. 407 del 27/02/2018 e co-finanziato dal Fondo Sociale Europeo – CUP B74I19000650001 – progetto AIM 1890405-3, area: "Tecnologie per gli ambienti di vita", S.C. 08/C1, S.S.D. ICAR/12.

Parte I

L'edificio salubre e confortevole

Part I. Salubrious and comfortable buildings

In the last decades, the approach towards architecture has changed, with a shift from environmental to human sustainability: since the '70s onwards, with the fuel crisis, the goal has become the improvement of energy efficiency; nowadays, the construction and management of a building are human-centered, with the purpose of guaranteeing salubrious and comfortable indoor environments. Even though the concept of "salubrious building" has only been expressed in the latest programmed actions, with the definition of the European Sustainable Development Goals, in the early '90s the World Health Organization defined a framework of symptoms to be associated with the construction modalities of modern or recently renovated buildings, with air conditioning and mechanical ventilation systems. Hence, the new salubrity goals of indoor spaces and the progress in the scientific field have allowed the evolution

of the concept of indoor comfort over time as well, providing the factors that concur to its improvement with a global, interdisciplinary, and interdependent dimension. This is evident in legislative frameworks, which initially set limits to the single parameters of the main aspects of the quality of indoor environments, but later they introduced a more elaborate calculation, to consider instrumentally unmeasurable parameters as well. This is because the aspects that can produce indoor discomfort are always interrelated, and a single parameter can influence different areas of comfort with different impacts.

The transition from "green building" to "salubrious building" is the object of this first part of the volume, together with the preliminary definition of the factors that contribute to the development of healthy and comfortable buildings.

Capitolo 1

Standardizzazione per la valutazione del comfort indoor nel patrimonio costruito

1. Modelli energetici per il comfort indoor nel patrimonio costruito

Metaforizzando il percorso che ha condotto ad un approccio all'architettura confortevole si potrebbe fare riferimento ai modelli energetici teorizzati da R. Banham. A partire dai modelli energetici "conservativo" e "selettivo" che ritroviamo entrambi nell'architettura di tipo tradizionale fino a quello "rigenerativo" approccio localizzabile temporalmente per tutto il XX sec.

Nel modello di tipo "conservativo" il comfort indoor è affidato all'uso di strutture di involucro "massicce", in grado di assorbire e immagazzinare il calore, con poche aperture e di dimensioni ridotte e volumi compatti. Nei climi estremi si sfrutta la soluzione ipogea o caverna [1]. In Italia è stato il primo modello energetico specificamente sostenuto da normative: la Legge 373 del 1976 e la Legge 10 del 1991 ponevano,

come obiettivo fondamentale, la conservazione, all'interno degli ambienti, delle condizioni di comfort ambientale e dell'energia termica nel periodo invernale, perseguita sia in funzione delle caratteristiche fisico-costitutive dell'involucro edilizio (trasmissione delle strutture di involucro), che in funzione delle sue connotazioni morfologiche [2].

Il modello energetico "selettivo" si avvale di elementi tecnologici che lasciano passare alcuni fattori climatici dall'esterno all'interno: la luce del sole, ad esempio, per il riscaldamento passivo e l'illuminazione. L'edificio si connota di sistemi di ventilazione passivi, elementi che concorrono al raffrescamento e al soleggiamento controllato. Tale modello ha trovato specifica formalizzazione, nel corso del Novecento, grazie all'opera di ricercatori come W. Köppen, V. Olgyay e, successivamente, di R. Knowles, E. Mazria ed altri. Tra le teorie principali si ricor-

da l'importanza dell'integrazione tra architettura e natura, quella di adattamento dell'edificio al clima e i modelli progettuali per l'accesso o schermatura solare [3]. Molti studi dell'epoca, inoltre, mostrano, per diversi contesti geografici, come le soluzioni architettoniche più antiche di adattamento dell'edificio alle condizioni climatiche costituiscano un buon rimedio per il raggiungimento del benessere negli ambienti interni.

Il terzo ed ultimo modello teorizzato è quello "rigenerativo", sviluppato con l'introduzione dell'elettricità per uso domestico e che si affida agli impianti di ventilazione meccanica per ricreare all'interno dell'abitazione le condizioni termo-igrometriche desiderate. Oggi accettabile solo se in rapporto all'obiettivo di "rigenerazione" dell'energia consumata dall'edificio e per la produzione energetica da fonte rinnovabile [4].

Nell'ultimo ventennio si è assistito ad un modello "bioclimatico", approccio che accoglie parte dei primi tre, ricercando tecniche e principi per ridurre l'impronta ambientale degli edifici e per creare, allo stesso tempo, un ambiente più confortevole in relazione agli stili di vita degli utenti. Nella progettazione si considerano gli effetti delle componenti ambientali, la presenza e l'importanza di elementi naturali in grado di provvedere alle esigenze energetiche e allo stesso tempo a condizioni confortevoli; si studia l'orientamento dell'edificio, la gestione degli spazi interni, la presenza e la disposizione delle aperture in funzione del contesto.

Gli interventi sugli edifici esistenti, nell'ultimo ventennio, hanno evidenziato una relazio-

ne tra comfort indoor e prestazione energetica che riguardasse per lo più la scelta dei prodotti e delle tecnologie di isolamento termico dell'involucro edilizio, nonché dei sistemi per la climatizzazione e la ventilazione interna naturale o meccanica; in realtà sono numerosi i fattori che potrebbero causare un discomfort dell'ambiente interno, seppur assolvendo al requisito di prestazione energetica. Tra gli esempi più comuni vi è l'uso diffuso per l'isolamento termico di materiali a base sintetica, altamente emissivi di inquinanti che contaminano la qualità dell'aria indoor; altri esempi sono la generazione di fenomeni di condensa, spesso generata da un eccessivo isolamento o, ancora, la presenza di sistemi impiantistici per la ventilazione meccanica e per il riscaldamento/raffrescamento, tra le più comuni fonti di inquinamento degli spazi confinati.

Ai modelli esposti, oggi, si aggiunge un'altra importante questione che sta emergendo nelle ultime politiche di indirizzo comunitario per la progettazione sostenibile ed è rappresentata da una maggiore attenzione verso l'uomo e tutti gli aspetti che potrebbero alterarne il comfort, la salute e il benessere. Il nuovo modello progettuale si può sempre considerare energetico ma, inoltre, integra la convergenza di nuove scoperte scientifiche nel campo della medicina, della psicologia e delle neuroscienze applicate all'architettura e specificamente mirate alla soddisfazione e alla salute degli utenti negli edifici ad alte prestazioni.

Negli ultimi anni la ricerca si è concentrata sul modo di costruire un edificio in grado di assicurare all'utente un ambiente sano e con-

fortevole [5]. Uno tra i primi studi sull'argomento è stato sviluppato presso l'Università di Stanford nel 2014, teorizzando un modello di progettazione di "edifici sani" [6] basato sui seguenti tre principi: a scala urbana più ampia, un paesaggio confortevole intorno all'edificio e l'ottimizzazione dei collegamenti con il centro urbano (ubicazione, contesto paesaggistico, servizi di mobilità, aree a verde a servizio del complesso edilizio); a livello di edificio, tecnologie per una costruzione sana, in riferimento alla tipologia costruttiva (ventilazione, involucro edilizio, schermature solari, ecc.); un design degli interni salubre (design ergonomico, materiali da costruzione salubri, vegetazione all'interno degli ambienti, ecc.).

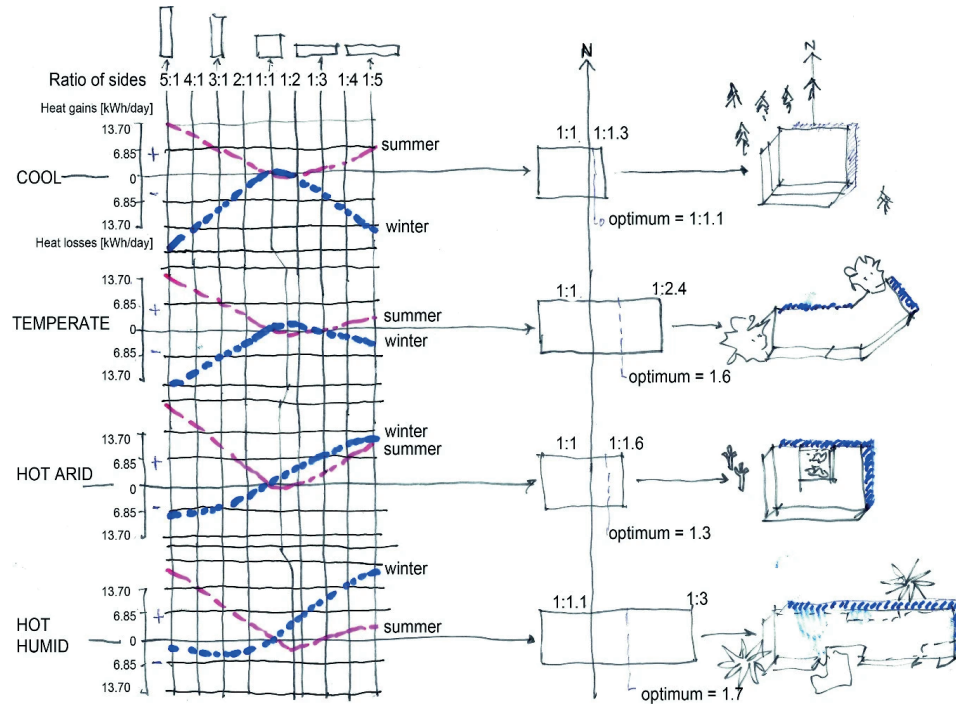
Sebbene oggi si sposi il modello bioclimatico, con particolare attenzione alla circolarità delle risorse e, come detto, all'uomo, il raggiungimento dell'obiettivo di realizzazione di edifici ad "energia quasi zero" [7], spinge la comunità scientifica e i progettisti a riosservare i primi due modelli energetici (conservativo e selettivo), in chiave contemporanea, con le possibilità prestazionali che le tecnologie oggi offrono. L'edilizia tradizionale, costruita in un'epoca nella quale la tecnologia risiedeva soltanto nell'ingegno umano, accoglie spesso concetti dell'architettura bioclimatica espressi con semplici accorgimenti costruttivi. Infatti, le tecnologie in architettura che assecondano i principi di comfort indoor e allo stesso tempo di progettazione sostenibile sono per lo più strategie passive, che potrebbero anche essere rivisitate sulla base delle conoscenze, competenze e tecniche che ci annovera la storia dell'archi-

tettura, valorizzando gli aspetti del contesto climatico esterno per la regolazione energetica interna. Tradizionalmente l'architettura è esito complesso, stratificato e plurisignificante di una cultura del costruire necessariamente attenta ai caratteri, alle condizioni ambientali del luogo ai materiali naturali a disposizione [8]. Dal passato, oltre alle soluzioni adattive degli edifici al contesto climatico, sono diversi, infatti, anche i saperi tecnici sull'uso e l'impiego di materiali semplici che non sono nocivi per l'uomo e che oggi si possono riproporre in chiave di circolarità delle risorse. L'origine naturale dei materiali usati nell'architettura tradizionale, inoltre, ha determinato involucri più permeabili, traspiranti, pur mantenendo una buona inerzia termica; questo rappresenta un valore aggiunto rispetto agli edifici di recente costruzione che basano la propria prestazione termica sugli impianti, sull'isolamento e sulla totale ermeticità dell'involucro (barriere al vapore, guaine, membrane, ecc.).

La tendenza nei prossimi anni è progettare efficaci sistemi passivi per fornire condizioni di comfort interno di alta qualità riducendo la domanda di energia. Alcuni studi avvalorano l'efficacia di tali sistemi, che richiamano soluzioni antiche, rispetto ad altri sistemi meccanici, soprattutto nei climi mediterranei. Le simulazioni che confrontano le condizioni di comfort interno, negli stessi ambienti interni, dimostrano che in molti casi sarebbe possibile eliminare completamente la necessità di impianti di raffrescamento meccanico a condizione che gli occupanti siano disposti ad accettare una condizione leggermente meno controllata e stabile

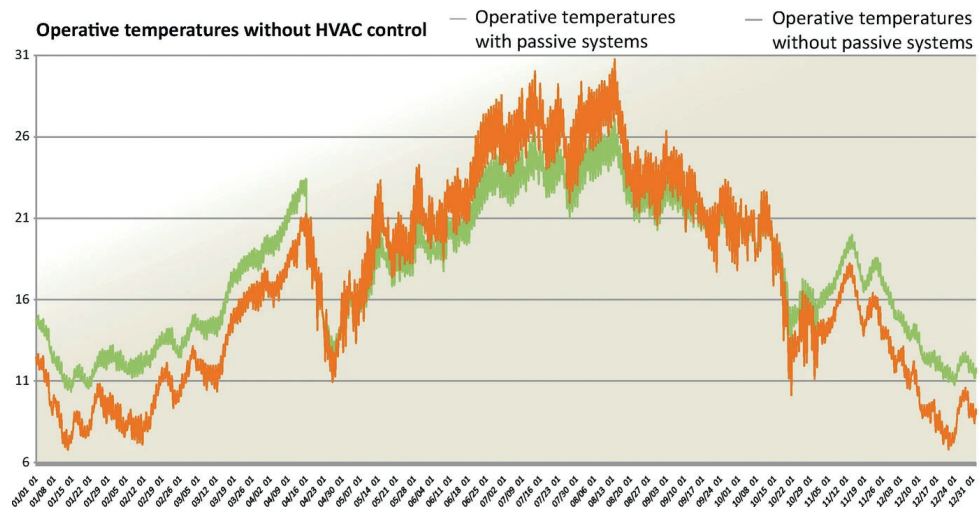
Diagrammi di Olgyay relativi al fabbisogno energetico e alla forma dell'edificio per i diversi climi. Olgyay definì un rapporto di interrelazione tra forma dell'edificio e tipologie climatiche, simulando il flusso d'aria intorno e all'interno di un edificio.

Fonte: Grosso, M., 2021 [3]



Studio di simulazione delle temperature operative orarie con (in verde) e senza (in arancione) sistemi passivi in un edificio in un contesto mediterraneo. Sono state pianificate strategie di raffrescamento passivo con tubazioni interrato. Il comfort interno simulato con sistemi passivi nel periodo estivo è migliore rispetto a quello dell'edificio controllato dalla climatizzazione tradizionale grazie alle buone prestazioni nelle ore più calde (al centro del grafico).

Fonte: Tucci, F., 2017 [9]



all'interno dell'edificio [9]. Nel clima mediterraneo, la ventilazione controllata naturale è particolarmente efficace nella riduzione dei consumi energetici e nel miglioramento della qualità dell'aria interna, anche nelle stagioni invernali e intermedie. L'integrazione di sistemi passivi per l'illuminazione e la ventilazione naturale, il riscaldamento e il raffrescamento di un edificio possono incidere in maniera sostanziale sulle strategie di miglioramento delle performance del patrimonio costruito esistente preservandolo da diversi fenomeni invasivi causati dal sovrautilizzo dei sistemi HVAC e dagli interventi massivi sulle murature [10]. La maggior parte dei sistemi passivi sono, infatti, reversibili, riconoscibili e garantiscono una minima invasività, risultando compatibili nella loro applicazione. I sistemi impiantistici, oltre che potenziali fonti di inquinamento sonoro e della qualità dell'aria negli ambienti confinati, costituiscono un rischio di alterazione delle caratteristiche materiche e tipologiche, fino a quelle morfologiche compromettendo i valori estetico-formali e la conservazione di elementi costitutivi dell'edificio. Da osservare nell'uso di sistemi passivi negli edifici esistenti vi sono, tuttavia alcuni elementi: il contesto climatico, in particolare se troppo freddo-umido; il paesaggio intorno, e in particolare se l'edificio si trovi in prossimità di fonti altamente inquinanti; le caratteristiche geo-morfologiche del sito e dell'edificio [11]. Confrontandosi con il patrimonio costruito non può esistere un modello di progettazione univoco, la soluzione è da valutare caso per caso in relazione ai vincoli alla conservazione delle preesistenze: alcuni elemen-

ti in edifici di particolare pregio potrebbero limitare l'intervento sui paramenti o sui soffitti, ad esempio, influenzando significativamente il comfort indoor; pertanto, è necessario equilibrare i vincoli alla conservazione dell'edificio con gli interventi possibili per il benessere indoor. A tal fine sono influenti le indagini conoscitive sull'edificio che restituiscano da un lato le prestazioni in essere per il comfort indoor e caratteristiche storiche, materiche e tecnologiche dell'edificio.

2. Influenza dei parametri ambientali indoor nella conservazione degli edifici

La qualità ambientale interna, oltre a determinare l'indice di comfort indoor per l'utente e il fabbisogno energetico del fabbricato, costituisce anche un ausilio alla conservazione del manufatto architettonico. I parametri ambientali indoor incidono sul processo di deterioramento dei materiali, finiture ed elementi decorativi innescando, caso per caso, alterazioni chimiche e/o fisiche e/o biologiche. In particolare, i fenomeni di degrado possono essere innescati da repentine variazioni del microclima interno o nel tempo, nei casi di climi particolarmente caldi o freddi, troppo umidi o secchi. Ad accelerare i fenomeni di degrado dei materiali è la combinazione con i processi chimico-ambientali (ad esempio l'aggressione da solfati o da cloruri) che si manifestano più frequentemente nei luoghi a diretto contatto con il terreno o a contatto con acque solfatiche o marine.

Una diretta conseguenza dello stress termi-

co è la dilatazione e contrazione volumetrica della materia, specie nei materiali organici igroscopici e anisotropi [12]; si generano tensioni tra due materiali a contatto con diverso coefficiente di dilatazione termica e internamente allo stesso materiale. Tali tensioni sfociano in microfratture che, oltre a rendere la parte debole alla resistenza meccanica, costituiscono punti di accesso e concentrazione d'acqua e sali solubili. La presenza di acqua nelle sue varie forme (umidità di risalita capillare, d'infiltrazione, di condensa, acque di ristagno, meteoriche diffuse) è una delle principali cause di patologie degenerative delle murature. La temperatura ha un effetto diretto sulla conservazione e uno indiretto in quanto influisce sull'umidità relativa dell'aria. L'umidità relativa è responsabile di molti meccanismi di deterioramento che influiscono sulla conservazione degli elementi di finitura: gli ambienti secchi diventano polverosi, con accrescimento del deposito elettrostatico, gli ambienti umidi aumentano la reattività chimica degli inquinanti gassosi [13]. L'umidità ha inoltre un effetto sinergico con la luce, la temperatura e altri fattori ambientali nell'accelerazione dell'alterazione cromatica dei materiali.

Anche in condizioni ambientali termo-igrometriche controllate, se in assenza di flussi d'aria, si potrebbe generare condensa delle superfici più fredde e in tempi lunghi si può verificare un deterioramento di tipo biologico con la colonizzazione di microrganismi autotrofi (batteri, alghe, muffe, parassiti, ecc.) che potrebbero intaccare irreversibilmente anche la stratigrafia interna degli involucri edilizi [14]. La presenza d'acqua rappresenta il maggior fattore scatenante, sia in

forma diretta che indiretta, di questo e di altri meccanismi di degrado. L'acqua è veicolo di soluzioni saline e ha effetto catalitico per l'innescamento delle reazioni chimiche; nel caso di suo movimento interno al substrato può esercitare un'azione disgregatrice generata dalla pressione di cristallizzazione dei sali all'interno di pori determinando, a seconda della tipologia di materiale, alveoli di varia dimensione spesso interconnessi e parti decoese fino al distacco. Sulla superficie di materiali calcarei, arenarie, travertino, in presenza di umidità protratta nel tempo e in ambiente protetto è elevata la possibilità di formazione di concrezioni con deposito e mineralizzazione di sali. In casi di temperature moderatamente basse l'acqua si può solidificare nel substrato determinando un rigonfiamento degli strati più superficiali. Gli effetti sui materiali sono strettamente connessi alle loro caratteristiche microstrutturali, prime fra tutte la gelività e la porosità.

Per prevenire o limitare i danni è importante predisporre periodicamente una campagna diagnostica volta a determinare con precisione le peculiarità del fenomeno e conoscere in modo dettagliato lo stato di conservazione dei vari componenti edilizi su cui si può intervenire.

La diagnostica aiuta a comprendere le caratteristiche tipiche degli elementi costruttivi presenti, l'eventuale presenza di condensa, le condizioni climatiche con cui l'edificio si rapporta e come queste influenzino la sua resilienza termoigrometrica, evitando rischi correlati a soluzioni inadeguate che possono accrescere o innescare ulteriore degrado fino a rendere gli ambienti interni insalubri.

Ciò che si esamina nella valutazione sono: le condizioni climatiche della zona e indoor, l'esposizione e il soleggiamento, il sistema di raccolta e di smaltimento delle acque; la morfologia e le caratteristiche geologiche del terreno con l'identificazione della falda freatica, la verifica dell'integrità dell'involucro e del sistema delle coperture, le caratteristiche meccaniche e chimico-fisiche dei materiali costitutivi, l'eventuale isolamento dal terreno. Nello specifico dei parametri interessanti il microclima indoor le indagini diagnostiche possibili sono da applicarsi sia nell'ambiente che nei materiali. Nei materiali si osserva la porosità, il grado di contenuto d'acqua, la permeabilità al vapore acqueo e il grado di solfatazione superficiale. Prove di invecchiamento accelerato quali, ad esempio, la termogravimetria consente di misurare la variazione di peso subita da un campione sottoposto a riscaldamento restituendo una curva di decomposizione termica. Nell'ambiente si possono monitorare, in certi gradienti temporali, la corrente d'aria e il grado di turbolenza (ad esempio con sonda globometrica) ed effettuare misurazioni termo-igrometriche con termocamera, rilevando anche le temperature superficiali con la possibilità di tracciare una mappa dell'umidità [15].

La norma UNI 10829:1999 "Beni di interesse storico artistico. Condizioni ambientali di conservazione. Misurazione ed analisi" [16], prescrive una metodologia per la misurazione in campo delle grandezze termoigrometriche, fornisce indicazioni relative alla modalità di elaborazione e sintesi dei dati e indica i parametri di riferimento ai fini della progettazione

della ambiente microclimatico nei luoghi di interesse storico e artistico. Per la conservazione di elementi in pietra, rocce e minerali, ad esempio, è accettata una temperatura variabile tra i 15 e i 25° C, un'umidità relativa compresa tra 20 e 60 % e un'escursione giornaliera di umidità tollerabile fino al 10%. Per le pitture murali, affreschi e sinopie è raccomandata una temperatura tra 10 e 24° C e un'umidità relativa tra 55 e 65 %. In Italia, nell'ambito VI "Valori di riferimento per assicurare le condizioni ottimali di conservazione dei manufatti" del D.M. 10/05/2001 "Atto d'indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei" [17], sono consigliati i valori termoigrometrici per assicurare le condizioni ottimali dei manufatti musealizzati; nel caso di pitture murali, ad esempio, l'umidità relativa è da mantenersi un un range di 45-60 % e la temperatura non dovrebbe scendere sotto i 6° C d'inverno e salire sopra i 25° C d'estate.

3. Progressiva transizione da green building a healthy building

Dalla definizione della norma UNI 8289:1981 in riferimento alla classe di esigenza di benessere quale "l'insieme delle condizioni relative a stati del sistema edilizio adeguati alla vita, alla salute ed allo svolgimento delle attività degli utenti" [18], il dibattito sul tema è maturato. Negli anni l'esigenza di benessere in architettura ha interessato settori multidisciplinari, divenendo, oggi, oggetto dei dibattiti interna-

zionali e presente nei Programmi di Azione per lo Sviluppo Sostenibile, in primis nell'Agenda 2030. Il benessere dell'individuo interessa la combinazione di aspetti multidisciplinari: fisici, psichici, culturali-sociali. Il modo in cui l'utente si relaziona con l'ambiente costruito è uno dei fattori predominanti, in considerazione che gli studi stimano che circa il 90% del tempo di un individuo è trascorso in uno spazio indoor.

Anche se la questione sembra emergente, i problemi legati all'inquinamento degli ambienti confinati sono andati delineandosi già negli anni '70 quando, attraverso azioni normative, la necessità di ridurre i consumi energetici ha portato all'aumento delle prestazioni di isolamento termico degli elementi di involucro e all'aumento della tenuta degli infissi. La conseguenza di tali interventi è stata una notevole riduzione del ricambio naturale dell'aria negli ambienti, da cui derivano il confinamento e l'aumento delle concentrazioni del vapore e degli inquinanti [19].

La crisi energetica e la progressiva presa di coscienza delle problematiche ambientali avvertite dagli anni '70 hanno reso evidente la limitatezza delle risorse e della capacità dell'ambiente di assorbire le emissioni inquinanti, sollecitando l'urgenza di incentivare la ricerca e l'utilizzo di risorse rinnovabili e di tecnologie adeguate, per l'ambiente stesso e per la salute dell'uomo [20].

Inoltre, l'avvento di nuovi materiali ha comportato una pratica progettuale, espressa soprattutto nei casi di intervento sul patrimonio edilizio esistente, che ha letteralmente irrotto sul funzionamento globale dell'edificio, slegan-

done le componenti. Sostituzioni improprie, con materiali non compatibili, parti o singoli elementi aggiunti gravando sulle strutture esistenti, ecc., hanno avuto come conseguenza la violazione delle concezioni originarie, che diversi edifici tradizionali conservavano. Il risultato, nella maggior parte dei casi, si è configurato nello sviluppo di involucri sigillati combinati con i sistemi meccanici di ventilazione, senza risolvere pienamente il requisito di comfort termigrometrico e a discapito di un ambiente interno non salubre. Altri interventi di trasformazione di spazi interni aperti con chiusura di cortili, chiostrine e vani scala, inserimento improprio di ascensori, sfruttamento di intercapedini per aumentare i volumi interni o di spazi sottotetto per ricavare nuove unità immobiliari, hanno condotto alla perdita prestazionale di soluzioni tecnologiche originariamente efficaci.

Tale problematica è stata evidenziata dalla Direttiva europea 2002/91/CE sul rendimento energetico dell'edificio che sottolineava la necessità di considerare i bisogni connessi all'uso dell'edificio compresa la ventilazione [21]. La norma armonizzata EN 15251:2006 [22] a supporto della Direttiva suggeriva, inoltre, come alla qualificazione energetica di un edificio era necessaria una contemporanea valutazione degli aspetti indoor. In riferimento, poi, la successiva Direttiva 2010/31/UE [23] del Parlamento Europeo e del Consiglio, che aggiornava la Direttiva 2002/91/CE, insieme ad azioni di risparmio energetico, raccomandava di considerare il comfort e le esigenze degli utenti nella possibilità di interazione con gli impianti e il clima esterno. È tuttavia evidente come la chiave di

tali disposizioni sia stata l'attenzione all'ambiente mediante il contenimento dei consumi energetici e che il comfort indoor era solo un elemento di contorno.

Nel frattempo, dagli anni '80, numerosi studi nel campo scientifico iniziavano a identificare una serie di sintomi epidemiologici e allergici in molti inquilini che passavano la maggior parte del loro tempo all'interno di spazi chiusi in edifici, per lo più uffici o abitazioni, di nuova costruzione. Si diffuse sempre più a livello mediatico la "malattia d'ufficio" e si intensificarono le ricerche nell'individuazione delle cause, fin quando, nei primi anni '90, l'Organizzazione Mondiale della sanità (OMS) coniò nei suoi rapporti ufficiali il termine "Sindrome da Edificio Malato" (SBS) [24]. L'OMS associò al sistema impiantistico e ai prodotti da costruzione l'origine dell'indice di qualità dell'aria interna. Negli anni immediatamente successivi; l'allarmismo generatosi riversò la questione sui prodotti per l'edilizia e sulla possibile dannosità per la salute umana e ambientale che, soprattutto quelli sintetici, potessero scaturire. Iniziarono, allora, ad apparire le prime etichette ecologiche, tra le quali Ecolabel UE istituito nel 1992 dal Regolamento Europeo n. 880/92 [25], che tenevano conto degli impatti ambientali dei prodotti o servizi lungo l'intero ciclo di vita, compresa l'emissività.

In quegli anni erano sempre dibattute le questioni legate al riscaldamento globale e all'esaurimento delle risorse naturali; quindi, il concetto di sostenibilità in architettura era sempre più correlato agli indici di consumo delle risorse e le prestazioni ambientali di un edificio

erano l'obiettivo primo. Solo in secondo luogo la presenza, il numero, la tipologia e le esigenze di comfort degli occupanti.

Un richiamo alle esigenze dell'individuo si ritrova nel Rapporto Brundtland (1987) [26], documento pubblicato dalla Commissione Mondiale delle Nazioni Unite per l'Ambiente e lo Sviluppo che sancisce il significato dello sviluppo sostenibile e tra le intenzioni è contemplata la tutela dell'individuo nel soddisfacimento dei bisogni fondamentali e nel garantirgli una vita migliore. Dagli anni '90 fino ai nuovi indirizzi europei la dimensione sociale della sostenibilità è affrontata in termini di equità, garanzia dei livelli di occupazione, partecipazione al processo decisionale, coesione sociale, responsabilità etica e maggiore democrazia.

Le azioni in architettura dell'ultimo ventennio riflettono l'emergenza del repentino cambiamento climatico e tra i principali indirizzi per il suo contenimento, gli obiettivi del Protocollo di Kyoto (1997) [27] di sostegno alle energie rinnovabili, mirano al miglioramento dell'efficienza energetica e alla riduzione delle emissioni di gas serra e al controllo delle risorse che ha condizionato le tecnologie, i materiali, i componenti e altri aspetti della progettazione che potessero influire sul consumo energia. Si è, in questi anni, affrontato in maniera viscerale la questione della prestazione energetica degli edifici ed i fattori ad essa connessi. Le aziende produttrici hanno fatto a gara nel realizzare sistemi impiantistici sempre più complessi e prestanti e componenti sintetici per l'involucro edilizio affinché siano raggiunti alti standard di isolamento.

L'interpretazione del concetto di sostenibi-

lità degli edifici è cambiata rapidamente negli ultimi anni ed è ancora in via di affermazione; tra gli obiettivi primari da perseguire, oggi, vi sono i requisiti di salubrità, igiene, ecologicità dei prodotti, di approvvigionamento delle risorse naturali, di riappropriazione dal passato delle tecnologie passive per il raggiungimento del microclima indoor ottimale. La progressiva sensibilizzazione sull'importanza del comfort indoor ha condotto ai giorni nostri ad un nuovo concetto di sostenibilità legato all'architettura spostando l'interesse dalla prerogativa "green" a quella di soddisfare i canoni del "wellbeing" o "comfort" indoor; il modo di concepire l'architettura ha virato dall'idea di Green building verso quella di Healthy building, secondo una visione attorno all'individuo. Se il Green building si indirizzava più verso una dimensione ambientale della sostenibilità, finalizzandosi a contenere il consumo energetico e utilizzando materiali e processi eco-compatibili, oggi, la priorità è garantire alti standard di qualità di vita alle persone e la sostenibilità ambientale è un mezzo per ottenerla. Si tratta di un'innovativa visione globale del manufatto edilizio, nel quale la sostenibilità sociale interessa effettivamente la salute e il benessere dell'individuo nei suoi ambienti di vita.

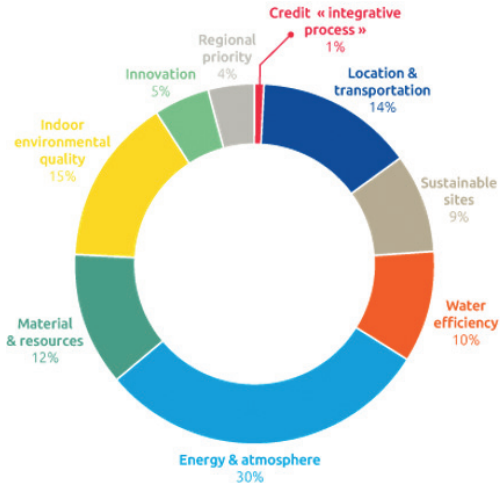
Il principio di sostenibilità, oggi, mira ad affrontare sia problemi del degrado ambientale che di qualità della vita, sostenendo uno sviluppo in grado di conservare i benefici di un ambiente sano e stabile a lungo termine. Nel processo di progettazione questo si traduce in un ambiente interno confortevole, nell'utilizzo di materiali sostenibili, nel basso consumo ener-

getico, in nuovi approcci tecnologici che contribuiscono a ricreare un edificio salubre in modo passivo [28, 29].

Anche il concetto di comfort è mutato nel corso degli anni. In passato le normative consideravano separatamente i diversi aspetti della qualità indoor, indicando specifici valori dei parametri. Oggi la valutazione del comfort indoor è frutto della combinazione di più componenti [30], coinvolgendo molti parametri anche non misurabili tramite strumentazione.

Guardando agli spazi confinati, oggi, ci si riferisce ad una qualità globale, andando ad approfondire anche la percezione dell'utente nei confronti dell'ambiente. L'utente, nell'idea di comfort, dovrebbe sostenere un ruolo attivo nella gestione del microclima interno. Il ruolo dell'individuo è tanto maggiore quanto più l'ambiente presenta un controllo climatico "naturale" frutto di una azione diretta dell'utente.

Oggi il comfort è espressione della capacità di adattamento dell'ambiente all'utente e non il contrario come avveniva in passato. Questo nella progettazione architettonica rappresenta una sfida, poiché la percezione della qualità di un ambiente interno può dipendere da innumerevoli fattori legati all'utente (dal livello d'istruzione, all'atmosfera psicosociale sul lavoro, al contesto urbano, all'età, al paese di origine, ecc.). Di conseguenza, offrire agli utenti la possibilità di agire sul controllo dell'interno di un ambiente potrebbe migliorare la generale qualità dell'abitare. Progettare per una "persona media" significherebbe soddisfare solo il 50% degli utenti; allora, come per il Design for All, la soluzione è la regolazione degli elementi nel-

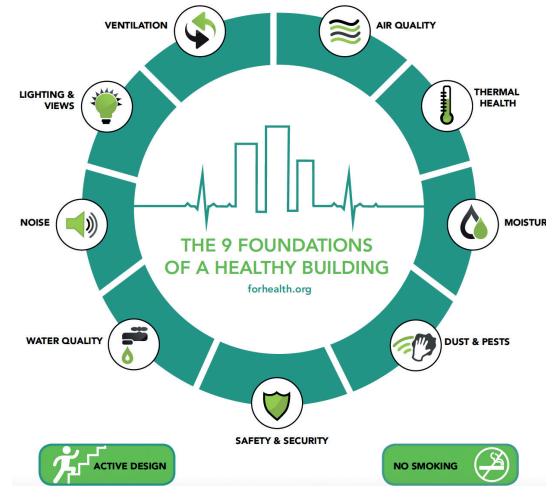


a

lo spazio interno, affinché si possa conformare a propria immagine. Tale concezione implica il superamento di un'architettura esclusivamente "green" connessa alla dimensione ambientale della sostenibilità e la nascita di un approccio che integri anche il concetto olistico di "uomo-ambiente", conferendo agli utenti un ruolo attivo, responsabile, nella gestione del proprio ambiente di vita.

La progettazione sostenibile contemporanea fonde le soluzioni naturali di condizionamento minimo (luce diurna, calore solare, ventilazione naturale) con le tecnologie innovative del presente in un sistema integrato "intelligente" che supporta il controllo individuale per ottenere la qualità ambientale con coscienza delle risorse.

Agli obiettivi previsti dal Green building e Healthy building si avvicina il c.d. Living building: edificio finalizzato a raggiungere un im-



b

patto zero a livello energetico senza l'uso di sostanze chimiche tossiche e con una produzione di energia esclusivamente da fonti rinnovabili. In questo caso il benessere dell'individuo è, anche, associato a concetti e criteri del design biofilico che evidenziano come la natura integrata nell'architettura possa sensibilmente influire sulla salute e benessere delle persone [31]. La progettazione biofilica condivide con quella salubre e a basso impatto ambientale alcuni obiettivi strategici (riutilizzo efficiente delle risorse naturali, il controllo della sostenibilità dei processi produttivi dei materiali da costruzione e della costruzione stessa, l'abbattimento dei consumi e dell'inquinamento), che nel loro insieme, hanno un impatto significativo sulla qualità degli ambienti interni.

a. Elementi cardine del Green Building Design and Construction secondo il noto protocollo LEED US Green Building Council (USGBC). Gli ambiti riflettono il loro potenziale impatto sulla sostenibilità. La qualità dell'ambiente interno ha un peso del 15% sulla valutazione complessiva. LEED è tra le certificazioni di sostenibilità degli edifici più usata oggi al mondo.

Fonte: <https://www.greenbuilding.saint-gobain.com/leed-v4>

b. Nove fondamenti di un edificio sano e confortevole individuati dalla "School of Public Health" dell'Università di Harvard presso il "Center for Climate, Health, and the Global Environment". I fondamenti sono l'esito di una ricerca su come gli ambienti costruiti oggi influiscono sulla salute, la produttività e il benessere delle persone che li vivono e su come gli edifici in futuro possono aiutare l'uomo a vivere una vita più sana.

Fonte: Allen, J. G., et al. 2017 [32]

4. Edificio “malato”. Fattori di discomfort

L'edificio sano è un'esigenza emergente nel campo dell'architettura e dell'ingegneria edile, soprattutto di fronte dei crescenti episodi di pandemie e cambiamenti climatici. La sua progettazione richiede una considerazione completa degli elementi associati al benessere e alla salute umana; tra i principi, la qualità ambientale interna ha un ruolo cruciale nel raggiungimento di tali obiettivi.

Attraverso i parametri fisico-ambientali, quali la temperatura, l'umidità relativa, l'acustica, la qualità dell'aria, l'illuminazione e la ventilazione, viene determinata la sensazione di comfort, come complessa risposta di un insieme di fattori ambientali, dell'ambiente fisico e dei servizi ma anche delle condizioni fisiologiche individuali, come la salute e le relazioni sociali.

L'attenzione al comfort, in particolare quello indoor, è stata da sempre connessa agli elementi nocivi che l'edificio può indurre sulla salute dell'uomo. Già nel 1993 l'Organizzazione mondiale della sanità (OMS) ha definito con il nome di Sindrome dell'edificio malato (Sick building syndrome – SBS) un “quadro sintomatologico, derivante dall'occupazione di edifici moderni o recentemente rinnovati, siano essi luoghi di lavoro o residenze, dotati di impianti di ventilazione meccanica e di condizionamento d'aria globale (senza immissione di aria fresca dall'esterno)” [33].

Le manifestazioni cliniche associate all'edificio sono aspecifiche e comprendono astenia, incapacità di concentrazione, cefalea, bruciore

agli occhi, lacrimazione, irritazione delle vie aeree nonché manifestazioni cutanee. L'insorgenza dei sintomi è temporalmente correlata con la permanenza in un determinato ambiente o nell'intero edificio e la loro risoluzione avviene nel corso di qualche ora o di qualche giorno (nel caso dei sintomi cutanei) dopo l'uscita dall'edificio. L'eziologia è, probabilmente multifattoriale e variabile da caso a caso. Fattori legati agli edifici, ai sistemi di condizionamento e di ventilazione, ai programmi di manutenzione, al tipo e all'organizzazione del lavoro e fattori personali svolgono certamente un ruolo rilevante.

I fattori ambientali più importanti per garantire il benessere degli occupanti e il contenimento dei consumi energetici sono il microclima interno, la concentrazione di sostanze inquinanti disperse nell'aria e depositate sulle superfici, la qualità e l'intensità luminosa e acustica.

In Italia, le costruzioni moderne o recentemente rinnovate a cui si riferisce l'OMS sono, nello specifico, quelle più diffuse: costruzioni edificate per lo più nel secondo dopoguerra, con strutture intelaiate in cemento armato e con una qualità architettonica ed energetica effetto di anni di urbanizzazione incontrollata e speculazione economica. Tipologie edilizie prive di qualsiasi accorgimento volto al contenimento dei consumi energetici, all'adattamento climatico, né tantomeno edificate con elementi tecnologici o prodotti da costruzione compatibili alla salubrità dell'ambiente interno. Al contrario, nelle costruzioni recentemente rinnovate si è puntato verso un'idea di ermeticità dell'involucro edilizio, volgendo ad

un isolamento termico eccessivo [34] accompagnato da complessi sistemi impiantistici di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria (HVAC). Tali impianti, oltre che consumatori di grandi quantità di energia, sono costituiti da componenti le cui superfici accumulano polveri captate al passaggio d'aria che li attraversa e che li riversa sull'ambiente. I filtri, in particolare, rappresentano la fonte di quasi metà dell'inquinamento atmosferico presente in uno spazio confinato, meccanicamente ventilato [35].

Progressi nel campo fisico-chimico hanno poi portato a un uso molto maggiore di materiali da costruzione sintetici, causa di diffusione di sostanze inquinanti volatili e per di più, l'ermeticità dell'ambiente non ha contribuito alla loro dispersione.

4.1 Discomfort relativo alla qualità dell'aria

Nel corso degli anni, da numerose indagini in edifici in cui sono stati segnalati problemi di salute o di comfort è emerso che il problema prevalente è costituito da una ventilazione inadeguata. Diversi composti chimici sia presenti nell'aria indoor che provenienti dall'outdoor sono noti causare irritazione o stimolazione dell'apparato sensoriale e possono dare vita a un senso di disagio sensoriale e ad altri sintomi comunemente presenti nella cosiddetta SBS. Negli ambienti indoor, trattandosi di spazi confinati, a seconda delle dimensioni e delle caratteristiche dell'ambiente, si possono verificare concentrazioni anche cinque volte superiori rispetto all'esterno [36].

La qualità dell'aria all'interno di ambienti confinati è l'indice di salubrità di un ambiente ed è definita accettabile se è percepita come fresca e piacevole. Le norme di riferimento affermano che l'aria è salubre se "accettabile" per almeno l'80% delle persone all'interno di un ambiente confinato [37]. Negli ambienti confinati si possono riscontrare agenti di tipo chimico (composti organici e inorganici), fisico (radiazioni ionizzanti e non ionizzanti) e biologico (microrganismi, muffe, acari).

Tra i principali determinanti della SBS individuati nei diversi studi, un ruolo di primo piano è svolto dagli agenti chimici nei materiali posti in opera. I contaminanti aerei possono presentarsi sotto forma di particelle (aerosol o particolato inquinante) o di gas, questi ultimi si distinguono in non organici e organici. I composti organici volatili COV possono essere rilasciati da vernici, adesivi e colle, lacche, materiali da costruzione sintetici, arredi vari. I COV possono essere causa di una vasta gamma di effetti che vanno dal disagio sensoriale fino a gravi alterazioni dello stato di salute; ad alte concentrazioni negli ambienti interni, possono causare effetti a carico di numerosi organi o apparati, in particolare a carico del sistema nervoso centrale; alcuni di essi sono riconosciuti cancerogeni (benzene) [38]. La tossicità varia in funzione della concentrazione e del tempo di esposizione.

Tra i composti non organici è diffuso il particolato atmosferico ovvero polveri sottili, dimensioni ridottissime che restano sospese nell'aria sotto forma di aerosol atmosferico, provocando danni anche gravi all'equilibrio ambientale. In contesti urbani densi è probabile che questo tipo

di inquinante possa venire dall'esterno: le fonti principali sono processi industriali, traffico veicolare e, se non adeguatamente mantenuti, anche da alcuni impianti di riscaldamento e condizionamento.

Altri microrganismi presenti nell'aria sono gli allergeni responsabili delle sindromi respiratorie e rimangono per lungo tempo nel pulviscolo degli ambienti.

Sono diffusi gli studi che hanno riportato episodi significativi, anche in Italia, dove però, non sono stati eseguiti studi epidemiologici su larga scala che abbiano interessato più edifici. Le alterazioni dei parametri ambientali che in genere le ricerche riportano, sebbene in alcuni casi significative, non sembrano da sole poter giustificare l'elevatissima prevalenza di una sintomatologia così complessa e strettamente correlata con la permanenza negli edifici studiati. Dunque, l'alterazione della qualità è un fattore che concorre fortemente al discomfort ma, nei casi di sintomatologie più gravi è probabile che non è l'unico. L'elevato impatto sociale della SBS, messo in evidenza dagli studi, vari in tutto il mondo, implica la necessità di un nuovo approccio dell'architettura verso spazi salubri e confortevoli. Un interessante studio effettuato in Macedonia [39] ha individuato gli inquinanti atmosferici in diverse abitazioni, principalmente VOC e PM_{2,5} e P10 riscontrando una dipendenza tra le caratteristiche degli edifici, con particolare riferimento a anno di costruzione o di ristrutturazione e sistema di riscaldamento).

I fattori principali che concorrono al mantenimento della salubrità dell'aria in un am-

biente chiuso sono il controllo del grado di umidità e della ventilazione. Un'umidità superiore al 60% può far proliferare microrganismi biologici (batteri, acari e virus); la ventilazione degli ambienti permette di rinnovare l'aria in un ambiente chiuso, sostituendola con aria più pulita e di diluire la concentrazione delle sostanze nocive prodotte da fonti interne. A meno di particolari contesti industriali è sempre consigliabile una ventilazione naturale in quanto, come già osservato, il sistema HVAC può essere fonte inquinante. La ventilazione, inoltre, influenza il grado di umidità eliminando il vapore acqueo in eccesso. Infine, insufficienti tassi di ventilazione possono far accumulare sulle superfici funghi, batteri, virus e microrganismi che evaporano sostanze inquinanti.

Anche l'Agenzia Europea per l'Ambiente (EEA), nei rapporti Environment and human health e Segnali Ambientali 2013 [40], ha evidenziato come i livelli indoor di inquinamento siano influenzati dalla qualità dell'aria ambiente, dai materiali di costruzione e dalla aerazione [41].

È sempre preferibile una ventilazione naturale poiché sistemi impiantistici se non correttamente mantenuti possono divenire essi stessi generatori di sostanze inquinanti in atmosfera. In sistemi con portata d'aria variabile controllata, la variazione della velocità di ventilazione nel tempo deve essere presa in considerazione nel calcolo dell'energia. Le portate d'aria di ventilazione negli edifici a ventilazione naturale devono essere calcolate in base alla disposizione dell'edificio, alla posizione e alle condizioni meteorologiche.

4.2 Discomfort relativo a fattori microclimatici

Per controllo microclimatico degli ambienti s'intende la possibilità di garantire livelli adeguati di comfort indoor regolando lo scambio termico tra esterno e interno dei parametri di temperatura, umidità relativa e flussi d'aria. Il controllo dell'ambiente microclimatico si può espletare mediante la predisposizione di sistemi passivi o attivi; i due sistemi possono anche essere combinati. Nel primo caso il raggiungimento dell'obiettivo di comfort è demandato alle caratteristiche tecnologiche e termofisiche dell'involucro edilizio, che possono, a seconda del contesto climatico del luogo, favorire o inibire il passaggio dall'ambiente esterno a quello interno di flussi d'aria, energia termica e vapore d'acqua.

Il microclima interno dipende dagli elementi e dai sistemi costruttivi che separano l'ambiente interno da quello esterno. Le prestazioni dell'involucro devono garantire una buona inerzia termica, proteggendo gli ambienti interni sia dal caldo che dal freddo e assicurare anche il comfort igrometrico, prevenendo i fenomeni di condensa superficiale e interstiziale. Nel caso di controllo del microclima con sistemi attivi, la tecnologia odierna consente una gestione automatica dei parametri, con possibilità di controllo in remoto di vari dispositivi. Tali sistemi ottimizzano le funzioni degli impianti tecnologici mediante la messa a punto di controller e agiscono in maniera attiva sul fabbisogno energetico dell'intero luogo costruito adattando la regolazione del sistema HVAC (riscaldamento, ventilazione e condizionamen-

to dell'aria) in funzione delle condizioni climatiche esterne. Se tali sistemi non sono progettati adeguatamente in funzione delle condizioni climatiche locali e/o non realizzati a regola d'arte si possono innescare repentine variazioni del microclima interno e costituire una delle principali cause di disagio per l'occupante e causare fenomeni di degrado nei materiali costitutivi dell'edificio.

Le condizioni termiche negli ambienti confinati sono soggette a numerose variabili che ne condizionano l'efficacia: variazioni climatiche esterne, insufficiente raffrescamento/riscaldamento, affollamento dei locali, sistemi di controllo della temperatura poco efficaci o non progettati in modo razionale. Se, all'interno dell'ambiente, si ricrea un effetto serra l'eccesso di calore può determinare rossore e dolore cutaneo, febbre, cefalea, disidratazione; crampi da calore fino alla degenerazione quando coesistono condizioni patologiche croniche, all'aumento del respiro, stato confusionale e possibile perdita di coscienza [42].

La temperatura ottimale corporea è di 37°C [43] il mantenimento di tale valore dipende dalla temperatura dell'aria, dalle temperature superficiali dell'involucro edilizio, dall'umidità relativa e da correnti d'aria. In presenza di equilibrio termico la temperatura corporea rimane costante; se l'equilibrio non viene soddisfatto, si presenta un innalzamento o un abbassamento della temperatura corporea con conseguente sensazione di caldo o di freddo. Eventuali correnti d'aria non controllate accelerano il fenomeno generando un ambiente termico non uniforme.

L'umidità è un parametro piuttosto variabile in funzioni delle condizioni climatiche e della morfologia dell'edificio. Il rapporto con il suolo di fondazione, l'eventuale presenza di falde acquifere, la stratigrafia dell'involucro sono solo alcune delle possibilità che inducono il verificarsi del fenomeno. Altre cause possono generarsi da perdite localizzate o da condensa dovuta a differenze di temperatura tra l'aria e le superfici di contatto più fredde. Il fenomeno è accentuato se l'ambiente non è adeguatamente ventilato. L'umidità influenza le emissioni di calore che avvengono per irraggiamento e traspirazione: un valore elevato ostacola la traspirazione mentre uno basso la aumenta. Il range ideale è tra 40 e 60%: non è consigliabile scendere sotto il 20% di umidità perché l'aria diventerebbe troppo secca causando un'elevata evaporazione delle mucose bronchiali e quindi secchezza nelle vie respiratorie; un'elevata umidità dell'aria, invece, riduce l'evaporazione del sudore e costituisce quindi uno stress termico per il soggetto ed, inoltre, aumenta il rischio di allergie e di formazione di condensa sulle superfici fredde dell'involucro edilizio, con conseguente sviluppo di organismi biologici [44]. Infine, inadeguate condizioni microclimatiche possono accelerare i fenomeni di degrado dei materiali accelerando processi chimico-ambientali e attivando variazioni volumetriche che generano tensioni interne sfociando in microfratture che, oltre a rendere la parte debole alla resistenza meccanica, costituiscono punti di accesso e concentrazione d'acqua, sali solubili, polvere e microrganismi.

I parametri ambientali di temperatura, umi-

dità relativa e velocità dell'aria devono essere opportunamente graduati affinché il corpo umano, con minimo impegno dei meccanismi di termoregolazione, non provi sensazione di freddo o di caldo o percepisca correnti d'aria. La valutazione del comfort termico negli ambienti moderati è regolata dalla norma tecnica UNI EN ISO 7730:2006 [45] mediante il calcolo degli indicatori sintetici di comfort o indici di Fanger: PMV (giudizio medio previsto, che esprime lo scostamento tra la situazione reale dell'ambiente termico rispetto a quella di benessere percepito) e PPD (percentuale prevedibile di insoddisfatti correlata al valore di PMV). La norma riporta come criteri di progettazione una temperatura operativa in estate fino a 24,5 °C e in inverno una minima di 22 °C, entrambi con 1 °C di tolleranza consentita e una velocità massima dell'aria di 0,12 m/s. La sola variazione della temperatura dell'aria di 1°C induce una variazione del PMV = 0,1. L'umidità relativa, al contrario di quanto precedentemente descritto in riferimento alle ideali condizioni per garantire stato di conservazione dei materiali, per il benessere dei fruitori potrebbe rappresentare un parametro secondario, influenzando sul PMV in misura pari a 0,06 unità per variazione dell'umidità relativa del 10%. In Italia, il D.P.R. 16 aprile 2013, n. 74 [46] raccomanda durante il funzionamento dell'impianto di climatizzazione invernale, una media ponderata delle temperature dell'aria, non superiore a 0°C + 2°C di tolleranza e durante il funzionamento dell'impianto di climatizzazione estiva, una media ponderata delle temperature dell'aria, non inferiore a 26°C con 2°C di tolleranza.

4.3 *Discomfort relativo ai livelli di rumorosità*

In Italia, la Legge quadro sull'inquinamento acustico n. 477/95 definisce l'inquinamento acustico come "l'introduzione di rumore nell'ambiente abitativo o nell'ambiente esterno tale da provocare fastidio o disturbo al riposo ed alle attività umane, pericolo per la salute umana, deterioramento degli ecosistemi, dei beni materiali, dei monumenti, dell'ambiente abitativo o dell'ambiente esterno o tale da interferire con le legittime fruizioni degli ambienti stessi" [47]. Studi recenti hanno dimostrato che il comfort acustico è uno dei fattori principali di insoddisfazione e disagio all'interno dell'ambiente e che contribuisce in modo significativo sulla percezione e sul comportamento umano, alterando il benessere fisico e psicologico.

Le fonti di rumore possono essere interne o esterne. Quelle esterne si configurano nel traffico veicolare, aereo o ferroviario e dall'eventuale presenza, in prossimità dell'edificio, di attività produttive industriali. In questi casi è l'involucro edilizio a dover essere in grado di schermare il rumore dall'esterno all'interno. Le fonti di rumore interne, possono essere presenti sia nell'ambiente che provenire dalle unità limitrofe, le più comuni derivano da impianti (ascensori, montacarichi, impianto meccanico di aereazione, impianto idraulico), da elettrodomestici, da apparecchiature radio-televisive, di origine antropica es. da calpestio. Anche nel caso di rumori tra unità adiacenti, l'involucro deve assolvere la funzione di isolamento acustico; invece, in ambienti particolarmente rumorosi si può prevedere l'installazione a parete o a soffitto di elementi fonoassorbenti e lavora-

re sulla distribuzione spaziale dell'edificio affinché locali rumorosi (es. quelli tecnici) siano collocati distanti da quelli maggiormente visuiti. Inoltre, nella progettazione delle chiusure che delimitano l'ambiente interno, occorre osservare sia le possibili trasmissioni dirette che quelle laterali del suono: nel primo caso si tratta del percorso principale del rumore attraverso la partizione; la trasmissione laterale è la propagazione indiretta del rumore attraverso le connessioni rigide delle partizioni (es. incastro paramento-solaio) che ne causa una diminuzione del potenziale isolamento prevedibile o previsto per sola trasmissione diretta. Infine, in considerazione che le normative determinano l'isolamento acustico minimo di facciata richiesto, in funzione di una mappatura del rumore esterno [48] e non della reale esposizione al rumore di ogni singola facciata dell'edificio, l'involucro edilizio potrebbe non essere prestante ai fini del comfort acustico degli occupanti, anche se i requisiti acustici rispettano i limiti imposti dalle normative.

L'orecchio umano è particolarmente sensibile alle variazioni di intensità sonore rispetto al livello esistente e pressioni sonore superiori a 60 db danno luogo a sensazioni di fastidio intollerabile; un rumore costante a 80 db può già comportare dei danni all'apparato uditivo [49]. L'OMS ha identificato un numero considerevole di effetti di livelli eccessivi di rumore negli ambienti indoor quali: fastidio, disturbi del sonno, irritabilità ed effetti a lungo termine come ipertensione e problemi psichiatrici [50]. Una progettazione poco accurata o la realizzazione di un isolamento acustico insufficiente

possono determinare discomfort acustico continuo generando, in particolari casi gravi, un deficit al sistema uditivo, fino ad effetti extra-uditivi relativi ai sistemi respiratorio e circolatorio. Un altro fattore di disturbo è il riverbero, fenomeno acustico legato alla riflessione dell'onda sonora da parte di un ostacolo posto davanti alla fonte sonora. Il riverbero ha aspetti negativi, come la scarsa intelligibilità del parlato e l'incomprensibilità di un suono [51]; esso dipende dalla frequenza del suono emesso dalla sorgente, dal volume dell'ambiente, dalla superficie e dalla natura delle pareti, dall'arredamento e dalla presenza, o meno, di occupanti.

4.4 Discomfort relativo a fattori di luminosità e abbagliamento

Il comfort visivo, necessità di carattere fisiologico e psicologico, è la sensazione determinata nell'occhio umano dalle onde elettromagnetiche. I requisiti per il comfort visivo dipendono dalle grandezze fotometriche: livello di illuminamento; rapporto fra l'intensità luminosa e l'area della superficie emittente apparente; fenomeno di abbagliamento sia diretto sia riflesso; direzionalità della luce; resa cromatica delle sorgenti e degli ambienti [52].

La non adeguata luminosità dell'ambiente interno conduce ad affaticamento oculare e difficoltà di messa a fuoco, di contro, la troppa luminosità può provocare uno stimolo alla lacrimazione eccessiva, irritazione oculare, dislacrimia e infiammazione congiuntivale.

Uno dei disturbi più frequenti è l'abbagliamento, causato da una elevata e disuniforme

luminanza all'interno del campo visivo o da eccessivi contrasti della sorgente abbagliante con le superfici dell'involucro edilizio. L'abbagliamento genera un peggioramento temporaneo delle funzioni visive, provocando un senso di disagio con disturbi astenopeici, difficoltà di concentrazione. Una buona luce, oltre a facilitare la funzione visiva, influisce sul sistema neurovegetativo, aumentando il benessere fisico, facilitando il movimento, massimizzando la capacità di attenzione ed evitando la stanchezza precoce [53]. Al fine di evitare fenomeni di abbagliamento connessi all'eccessivo contrasto di luminanza tra superfici vetrate e superfici opache, occorre verificare, in relazione del contesto esterno climatico, le dimensioni e l'orientamento delle superfici vetrate, nonché i fattori di riflessione delle pareti opache. Sono diversi i sistemi di schermatura solare fissi o regolabili che filtrano la luce naturale (tende, veneziane, frangisole, persiane, schermi, ecc.), riducendo l'abbagliamento in condizioni di elevata luminanza.

L'involucro edilizio risponde ai requisiti di comfort visivo mediante aperture o chiusure trasparenti che, inoltre, possono servire a ventilare naturalmente l'ambiente. La luce naturale si relaziona in modo dinamico col contesto ambientale ed è in funzione della morfologia dell'edificio che penetra più o meno internamente [54]. Dunque, nella progettazione delle aperture e della conformazione della facciata (balconi, elementi aggettanti, pensiline e altro) è sempre necessario studiare l'emiciclo solare riferito al contesto.

Nelle latitudini meridionali europee duran-

te l'estate le aperture esposte a sud consentono la penetrazione della luce solare solo in un'area limitata alla base dell'apertura stessa e quindi è sufficiente un oggetto di dimensioni ridotte posto al di sopra dell'architrave per schermare i raggi; sempre in estate, a nord il sole penetra profondamente nelle prime ore del mattino e in quelle pomeridiane; le aperture a est e a ovest richiedono una schermatura dalla luce diretta poiché il sole penetra in profondità gran parte della giornata; d'inverno, i raggi solari entrano con un angolo molto obliquo dalle finestre esposte ad est o ad ovest e a sud entrano invece per quasi tutta la durata del giorno.

Molti studi hanno dimostrato come la luce naturale influisca positivamente sulle persone, incrementando il benessere visivo, fisiologico e psicologico.

Attraverso luce naturale, infatti, si percepisce il trascorrere del tempo e a livello fisiologico, essa favorisce la produzione di serotonina (ormone responsabile del benessere) e riduce la concentrazione di ormoni responsabili dello stress [55]. Inoltre, ai fini di avere un buon comfort visivo, diverse analisi hanno mostrato che la luce naturale dovrebbe entrare nell'ambiente

indoor in modo diretto per mezzo delle finestre che dovrebbero ricoprire almeno il 10% della superficie del piano di calpestio [56] (le norme igienico-sanitarie italiane fanno riferimento ad un'aliquota di illuminazione pari ad almeno 1/8 dell'area del solaio) [57].

In contesti urbani i due parametri ai quali facevano più spesso riferimento gli studi e la normativa sviluppata nell'Ottocento e ancora oggi calcolati erano: l'angolo di apertura, l'angolo cioè ottenuto tracciando da un punto interno al locale le rette tangenti all'architrave della finestra e alla linea di colmo della copertura dell'edificio prospiciente; l'angolo di elevazione, cioè quell'angolo che un raggio luminoso tangente allo spigolo dell'architrave forma con l'orizzontale [20]. In questo modo si fissava l'apertura minima dei due angoli che può fornire un'illuminazione sufficiente.

Quando la luce naturale non è disponibile si ricorre alla luce artificiale calibrando la scelta d'intensità luminosa, il colore e la distribuzione delle sorgenti luminose; ciò, in funzione della destinazione d'uso degli ambienti, dei volumi, del colore e dei materiali delle finiture delle pareti.

Bibliografia

1. Banham, R., *The Architecture on the Well-Tempered Environment*, Architectural Press, London, trad. it., in *Ambiente e tecnica nell'architettura moderna*, Laterza, **1978**
2. D'Olimpio, D., *Nuovi paradigmi energetico-ambientali per l'architettura*, in *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, 13, Firenze University Press, **2017**
3. Grosso, M., *Origin and Evolution of the Bioclimatic Approach to Architecture*, in *Bioclimatic Approaches in Urban and Building Design*, Springer, **2021**, pp. 119-152
4. Tucci, F., *Climate responsive envelopes: Frontiere dell'innovazione tecnologica e prestazionale nel progetto della pelle degli edifici*, Altralinea Edizioni, **2021**
5. Baker, N., Steemers, K., *Healthy homes: designing with light and air for sustainability and wellbeing*, Routledge, **2019**
6. Russell-Smith, S. V., Lepech, M. D., Fruchter, R., Meyer, Y. B., *Sustainable target value design: integrating life cycle assessment and target value design to improve building energy and environmental performance*, in *Journal of Cleaner Production* 88, **2015**, pp 43-51.
7. Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, *Direttiva 2018/844 del 30 maggio 2018 che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica*, Gazzetta ufficiale dell'Unione europea L 156/75, **2018**
8. Franco, G., *Innovazione e sostenibilità in un paesaggio culturale/Innovation and sustainability in a cultural landscape*, in *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, 5, Firenze University Press, **2013**
9. Tucci, F., *Passive Cooling in Mediterranean Area for a Bioclimatic and Zero Energy Architecture*, in *Mediterranean Green Buildings & Renewable Energy*, Springer, **2017**, pp. 773-783
10. Calzolari, M., Lucchi, E., *Monitorare sul campo la prestazione energetica di tecnologie compatibili con gli edifici storici*, in *L'Ufficio Tecnico*, **2018**, pp. 5-14.
11. De Vita, M., *Architectural Heritage and retrofit measures: The improvement of buildings performance through passive compatible strategies*, in *Proceedings of the XXXV International Congress Scienza e Beni Culturali, Il Patrimonio Culturale in Mutamento, Le sfide dell'uso*, Bressanone, **2019**, pp. 2-5
12. Amoroso, G., Camaiti, M., *Il degrado dei monumenti in Trattato di scienza della conservazione dei monumenti*, in *Etica della conservazione, degrado dei monumenti, interventi conservativi, consolidanti e protettivi*, Alinea editor, **2002**
13. Aghemo, C., Filippi, M., Prato, E., *Condizioni ambientali per la conservazione dei beni di interesse storico e artistico. Ricerca bibliografica comparata*, Comitato Giorgio Rota, **1996**
14. Morando, M., Matteucci, E., Nascimbene, J., Borghi, A., Piervittori, R., Faverolongo,

- S.E., *Effectiveness of aerobiological dispersal and microenvironmental requirements together influence spatial colonization patterns of lichen species on the stone cultural heritage*, in *Science of the Total Environment* 685, **2019**, pp.1066-1074
15. Corgnati, S. P., Filippi, M., *Assessment of Thermo-Hygrometric Quality in Museums: Method and In-Field Application to the "Duccio Di Buoninsegna" Exhibition at Santa Maria Della Scala (Siena, Italy)*, in *Journal of Cultural Heritage* 11, **2010**, pp 345-349
 16. Ente Italiano di Normazione, *UNI 10829:1999 Beni di interesse storico e artistico. Condizioni ambientali per la conservazione – Misure ed analisi*, **1999**
 17. Repubblica Italiana, Ministero per i Beni e le Attività Culturali, *Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei (art. 150, comma 6, D.L. del 1998, n. 112)*, **2001**
 18. Ente Italiano di Normazione, *UNI 8289:1981 Edilizia. Esigenze dell'utenza finale. Classificazione*, **1981**
 19. Lucarelli, M. T., Pennestrì, D., *School buildings and indoor air quality: Diagnostic procedures and criteria for intervention*. in *TECHNE. Journal of Technology for Architecture and Environment*, 9, Firenze University Press, **2015**
 20. Vinci, C., *La costruzione sana. Criteri di sostenibilità tra tradizione e innovazione*, Edizioni Fotograf, **2013**
 21. Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, *Direttiva 2002/91/CE del 16 dicembre 2002 sul rendimento energetico nell'edilizia*, Gazzetta ufficiale dell'Unione europea L 1/65, **2002**
 22. Comitato Europeo di Standardizzazione e Normalizzazione – CEN, *EN 15251:2006, Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*, **2006**
 23. Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, *Direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia*, Gazzetta ufficiale dell'Unione europea L 153/13, **2010**
 24. World Health Organisation (WHO), *Indoor Air Pollutants: Exposure and Health Effects*, in *EURO Reports and Studies* 78, Copenhagen, **1983**
 25. Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, *Regolamento (CEE) n. 880/92 del Consiglio, del 23 marzo 1992, concernente un sistema comunitario di assegnazione di un marchio di qualità ecologica*, Gazzetta ufficiale dell'Unione europea L 99/1, **1992**
 26. World Commission on Environment and Development (WCED), *Our common future—The Brundtland report. Report of the World Commission on Environment and Development*, Oxford University Press, **1987**
 27. United Nations, *Kyoto Protocol to the United Nations framework convention on climate change*, **1998** <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>
 28. Becerik-Gerber, B., Kensek, K., *Building information modeling in architecture, engineering, and construction: Emerging research directions and trends*, in *Journal of pro-*

- fessional issues in engineering education and practice, 136(3), **2010**
29. Sassi, P., *Thermal comfort and indoor air quality in super-insulated housing with natural and decentralized ventilation systems in the south of the UK*, in Architectural Science Review 60(3), **2017**, pp. 167-179
 30. Nicolini, E., *Built Environment and Wellbeing—Standards, Multi-Criteria Evaluation Methods, Certifications*, in Sustainability 14(8), **2022**
 31. Falzetti, A., Macaione, I., Autilio, V., *Order, complexity, measure. The project between architecture and nature*, in AGATHÓN|International Journal of Architecture, Art and Design, 11, **2022**, pp. 104-113
 32. Allen, J. G., Bernstein, A., Cao, X., Eitland, E., Flanigan, S., Gokhale, M., Yin, J., *The 9 foundations of a healthy building*, in Harvard: School of Public Health, **2017**
 33. Repubblica Italiana, Ministero della Salute, *Sindrome dell'edificio malato*, <https://www.salute.gov.it/portale/temi/>
 34. Waring, M. S., Siegel, J. A., *Particle loading rates for HVAC filters, heat exchangers, and ducts*, in Indoor air 18(3), **2018**, pp. 209-224
 35. Losasso, M., *Progetto e innovazione: nuovi scenari per la costruzione e la sostenibilità del progetto architettonico*, in Progetto e innovazione, **2005**, pp. 1-125.
 36. Lorusso, S., Natali, A., *La qualità dell'aria in ambienti confinati*, in Quaderni di scienza della conservazione 4, **2005**, pp. 215-238
 37. Fenn, B., Chalabi, Z., Foss, A., Wilkinson, P., *Housing and health: health risk modelling in the INTARESE project*, in 5th Warwick Healthy Housing Conference, **2008**
 38. Heseltine, E., Rosen, J., *WHO guidelines for indoor air quality: dampness and mould*, WHO Regional Office for Europe, **2009**
 39. Cumo, F., Caruso, G., Ferroni, L., Paladino, E., *L'indice di valutazione dell'Indoor Air Quality come indicatore di sicurezza in ambienti lavorativi confinati, con particolare riferimento al terziario avanzato*, in Conferenza VGR 2006 Valutazione e Gestione del Rischio negli Insediamenti Civili e Industriali, **2006**, pp. 17-19
 40. Agenzia Europea per l'Ambiente (AEA), *Segnali Ambientali 2013. L'aria che respiriamo. Migliorare la qualità dell'aria in Europa*. Copenhagen, **2013**
 41. Settimo, G., *Qualità dell'aria negli ambienti confinati: aspetti tecnici e legislativi*, in Rapporti ISTISAN 15, **2015**
 42. Del Gaudio M., Freda D., Lenzuni P., Nattaletti P., Sabatino R., *La valutazione del microclima, l'esposizione al caldo e al freddo: quando è un fattore di discomfort quando è un fattore di rischio per la salute*, in Rapporto INAIL, Direzione regionale per la Campania, **2018**
 43. Chirico, F., *Il comfort termico negli ambienti di lavoro: Strumenti per la consulenza tecnica e la sorveglianza sanitaria*, Edizioni Ferrari Sinibaldi, **2017**
 44. D'Ambrosio Alfano F. R., Ianniello E., Palella B.I., *Relazione tra valutazione soggettiva e oggettiva del benessere termico in alcuni edifici scolastici italiani*, in AICARR JOURNAL 28, **2014**, pp.42-48

45. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 7730:2006, Ergonomics of the thermal environment Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*, **2006**
46. Repubblica Italiana, *D.P.R. 16 aprile 2013, n. 74 Regolamento recante definizione dei criteri generali in materia di esercizio, conduzione, controllo, manutenzione e ispezione degli impianti termici per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici*, GU Serie Generale n.149, 27-06-2013, **2013**
47. Repubblica Italiana, *Legge 26 ottobre 1995, n. 447 Legge quadro sull'inquinamento acustico*, GU Serie Generale n.254 del 30-10-1995, **1995**
48. Altomonte, S., Rutherford, P., Wilson, R., *Human factors in the design of sustainable built environments*, in *intelligent Building International* 7 (4), **2015**, pp. 224–241
49. Rendina, E., *Inquinamento acustico*, Key Editore, **2019**
50. World Health Organization (WHO), *World Health Report: Prevention of Noise-Induced Hearing Loss*. Geneva: World Health Organization 55, **1997**
51. Romano, R., Konstantinou, T., Fiorito, F., *Beyond sustainability. Regenerative technologies for a restorative indoor environment*, in *TECHNE-Journal of Technology for Architecture and Environment*, **2021**, pp. 315-326
52. Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H. X., Tsangrassoulis, A., *Daylight in Buildings and Visual Comfort Evaluation: The Advantages and Limitations*, in *Journal of Daylighting* 8(2), **2021**, pp. 181-203
53. Chinazzo, G., Wienold, J., Andersen, M. J. L. R., *Influence of indoor temperature and daylight illuminance on visual perception*, in *Lighting Research & Technology* 52(3), **2020**, pp. 350-370
54. Mottura, G. Pennisi, A., *Serramenti e schermature solari*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, **2014**
55. Galatioto, A., Beccali, M., *Aspects and issues of daylighting assessment: A review study*, in *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 66, **2016**, pp. 852-860
56. Aghemo, C., Piccoli, B., *Analisi delle condizioni illuminotecniche nei luoghi di lavoro*, in *Giornale italiano di medicina del lavoro ed ergonomia* 26(4), **2004**, pp. 395-400
57. Repubblica Italiana, *Decreto Ministeriale 05/07/1975, Modificazioni alle istruzioni ministeriali 20 giugno 1896, relativamente all'altezza minima ed ai requisiti igienico-sanitari principali dei locali di abitazione*. Gazzetta ufficiale n. 190 18/07/1975, **1975**

Parte II

Il comfort indoor nel patrimonio costruito.

Processi legislativi e valutativi

Part II. Indoor comfort in the built environment. Legislative aspects and assessment processes

In the last decades, IEQ (Indoor Environmental Quality) has been discussed, with a specific focus on the salubrity of the built environment and its possible influence on environmental sustainability. This interest has mainly involved the quality of building products and technologies, with a focus on their performances and environmental effects. The goals set by the 2030 Agenda have overcome the idea that sustainability is only an environmental aspect, affirming a holistic vision centered on human health (goal 3). This is the consequence of the shift from a “Green” approach to the built environment to a “Human-Centered” approach, in which design is centered on people, who are involved in the first place and listened to, developing “participatory design” processes. Part II

of the present volume is focused on standardized legislative and evaluation parameters and processes, which could affect human well-being and health in the built environment. International and national legislative frameworks are analyzed for this purpose, examining the most common multicriteria evaluation system for the achievement of building environmental certifications (LEED, BREEAM, and WELL), with a particular focus on the aspects related to users and their comfort. This is compounded by the description of the main standardized methods in the European legislative framework for the analysis and evaluation of thermo-hygrometric, acoustic, and visual indoor comfort and air quality, in addition to the tools for the detection and measurement of the parameters required for the definition of the salubrity and well-being levels of the users of an indoor space.

Capitolo 1

Standardizzazione per la valutazione del comfort indoor nel patrimonio costruito

Chapter 1. Standardization for the Indoor Comfort Assessment for the built environment

Indoor Environmental Quality (IEQ) is the definition of the level of compliance of the performance of a building to requirements related to occupants' needs. Its assessment is complex, due to the involvement of both immaterial (psychological) and material (physical and environmental) aspects. However, this theme has been discussed with increasing interest; in the current legislative framework, which is oriented toward users' health, it now integrates the well-known aspects related to energy saving.

The most recent European Directive on the energy performance of buildings (EPBD 2018/844) adopts the concept of "indoor environmental climate" and describes the elements that affect it; however, it does not include specific indicators to support the design of salubrious and comfortable indoor environments [1]. Instead, instrumentally measurable indicators are

described in technical codes; among the most recent ones is the UNI EN 16798-1:2019 code, regarding the assessment of building energy performance in relation to indoor air quality, thermal environment, lighting, and acoustics [2]. In particular, the code measures IEQ according to local discomfort factors: air currents, radiant asymmetry, vertical thermal gradient, floor temperature, etc. Recent studies have led to an improvement of standards, through the definition of multiple parameters with better-performing allowable ranges. However, other research works have shown that even when indoor parameters fall within the allowable ranges, not all the users of a building are satisfied with their indoor environment. Aside from the diversity in people's perceptions, the reason could be retraced to non-environmental factors, which affect both physical conditions and perception [3].

In a human-centered vision, IEQ is connected to the concept of social sustainability, as it represents a response to users' needs and is evaluated according

to the users' perception of an environment. This is corroborated by a conspicuous scientific literature, in which this subject is discussed in several disciplinary sectors. Moreover, the connection between buildings and health has been discussed when the World Health Organization coined the term "Sick Building Syndrome (SBS)", blaming chemical compounds in indoor air and the employed building materials for users' sensorial discomfort [4]. Therefore, ASHRAE codified the IAQ (Indoor Air Quality) standard, defining an acceptable level of carbon anhydride and the conditions for an efficient air exchange system* On this topic, it is worth mentioning the research works – which were crucial for the following legislative frameworks – which have associated inadequate thermos-hygro-metric comfort conditions with the risk of lung diseases in residential buildings, and with a decisive reduction of the attention level in workplaces [6]. As of today, the legislative framework does not still provide standardized methods to assess user perception of indoor comfort. However, since 2019 it is possible to refer to UNI EN ISO 10551:2019 code "Ergonomics of the physical environment – Subjective

judgement scales for assessing physical environments" [7], which presents principles and examples to use for the construction of appropriate judgment scales for the assessment of physical environments. This code considers perception, well-being, preference, and acceptability scales, expressions and tolerance forms, and environmental aspects, including thermal and visual ones, air quality, acoustics, and vibrations. The scales developed through this code can be included in surveys or questionnaires. With reference to the built heritage, it can be observed that the legislative framework that regulates the comfort of internal environments does not consider the specificities of the building types. Both the standards that regulate the comfortable parameters and the procedures for assessing the well-being of the internal environment are equally applicable for all buildings: new and existing. This implies some considerations in this regard, also bearing in mind the existing constraints of the built structure and the legislation on the protection of buildings existing for more than seventy years or of particular value.

1.1 Indirizzi internazionali

La cultura del costruire per la qualità dello spazio indoor è un atto che contribuisce a perseguire il bene comune ed è l'argomento caratterizzante della Dichiarazione congiunta che i Ministri dei Paesi che hanno aderito alla Convenzione Culturale Europea hanno accolto a Davos nel 2018 [8], indicando la necessità di introdurre a livello politico e strategico una Baukultur di alta qualità. Il termine "Baukultur" indica ogni attività umana che trasforma l'ambiente costruito e che influenza la qualità e il processo di pianificazione e costruzione [9].

La Dichiarazione di Davos esprime che una cultura della costruzione di qualità non risponde soltanto a esigenze funzionali, tecniche ed economiche, ma anche ai bisogni sociali e psicologici della popolazione e che ciò dovrebbe essere previsto negli strumenti legislativi. La cultura della costruzione di qualità ha un impatto fondamentale sul modo in cui le persone si comportano e vivono quotidianamente, rafforza, infatti, il senso di appartenenza, permettendo agli utenti di identificarsi con il proprio ambiente di vita e agevolando l'integrazione e il senso civico.

La più recente Dichiarazione di Innsbruck (maggio 2019) "How to Achieve Quality in the Built Environment: Quality assurance tools and systems" presentata in occasione della conferenza del Consiglio degli Architetti d'Europa (ACE), richiama la precedente Dichiarazione e segna un ulteriore passaggio decisivo utile a chiarire le buone pratiche per la valutazione della qualità nell'ambiente costruito [10]. La

Dichiarazione ACE sottolinea la complessità di tale processo di valutazione in relazione a diversi fattori, tra questi il contesto, che è sempre diverso: caratteristiche che sono considerate qualità in un luogo possono essere svantaggi in un altro.

La qualità del costruito dipende, inoltre, in una certa misura, dalla percezione di chi guarda e vi sono alcune caratteristiche essenziali di un luogo che sono attrattive, portatori di benefici di natura economica, sociale, ambientale e culturale per gli individui e la società. Le caratteristiche essenziali che la Dichiarazione indica per la valutazione della qualità di un luogo sono: aesthetics, habitability, environment friendly, accessibility and mobility, inclusiveness, distinctiveness and sense of place, affordability, integration into the surrounding environment. La Dichiarazione ACE suggerisce, anche i seguenti principi da considerare nel processo di valutazione: la qualità deve essere discussa interdisciplinariamente, con il coinvolgimento politico e la partecipazione dei cittadini, con un approccio place-based (che tenga conto delle specificità e della storia di un luogo), olistico (che consideri tutti gli impatti sociali, ambientali, culturali ed economici) e vivo (facendo particolare riferimento al riuso dell'esistente) [11].

Il contesto nel quale le Dichiarazioni si inseriscono riprendendone i principi, è l'Agenda 2030 programma di azione universale predisposto nel settembre 2015 dagli stati membri dell'ONU. L'Agenda contenente 17 obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile [12], risultato di consultazioni pubbliche con la società civile, rappresenta un importante indirizzo a livello mondia-

le nell'approccio allo sviluppo sostenibile. Tra gli obiettivi si ricorda la promozione della salute e del benessere delle persone (obiettivo 3), inclusa la prevenzione delle malattie dovute all'esposizione a inquinanti [13]. Benessere e confort dell'individuo e salubrità si riferiscono ai fattori biologici, fisici e chimici derivanti anche dagli edifici che devono essere progettati sempre in riferimento alla normativa igienico/sanitaria e alla giurisprudenza in materia di fruibilità. Si può dedurre dunque che il valore di un edificio, ad oggi, non dipende più solo dalle sue caratteristiche, ma anche dalle sue prestazioni nella sfaccettatura di soddisfacimento del benessere degli occupanti.

L'obiettivo 7 mira a raddoppiare entro il 2030 le azioni di miglioramento dell'efficienza energetica e intervenire nel settore edilizio significa risparmiare circa il 60% delle emissioni di gas serra globali [14], in particolare, lavorando sulle prestazioni dell'involucro edilizio con l'obiettivo di migliorarne le caratteristiche di isolamento termico, si abbattano sensibilmente le emissioni dovute al riscaldamento e al raffrescamento. Si ricorda, infine, l'obiettivo 11 finalizzato a rendere le città e gli insediamenti umani inclusivi, sicuri, duraturi e sostenibili [15] che richiama anch'esso la necessità di ridurre l'impatto ambientale delle città, prestando particolare attenzione alla qualità dell'aria, alla sicurezza degli utenti, anche in riferimento ai servizi (acqua, mobilità, gestione rifiuti urbani, ecc.). Tale quadro indirizza a garantire un benessere abitativo insieme ad un investimento energetico sostenibile per l'intera comunità tale da permettere di abbassare le emissioni di gas

e di polveri sottili e generare un ambiente salubre.

Già nel 1977 la 30° Assemblea Mondiale della Sanità stabilì che l'obiettivo principale dei governi e dell'OMS (Organizzazione Mondiale della Sanità) doveva essere il conseguimento da parte della comunità mondiale di un livello di salute adeguato a rendere possibile una vita socialmente ed economicamente produttiva, sottolineando che gli edifici dovevano rispondere in modo confortevole all'uso a cui sono destinati [16]. L'Ufficio Regionale Europeo dell'OMS nel 1984 propose la strategia HEALTH21 fornendo ai governi europei delle Linee Guida con target volti alla prevenzione e promozione della salute, tra questi alcuni riferiti agli ambienti confinati (target 10–13) [17]. Secondo l'OMS un ambiente fisico è sano e salubre quando in grado di tutelare la salute e promuovere il benessere fisico e mentale degli occupanti attraverso una progettazione della costruzione e una sua manutenzione in grado di supportare un ambiente sostenibile [18].

Oggi la letteratura legislativa relativa al comfort indoor degli edifici esistenti è in linea con gli indirizzi sopradescritti poiché in particolare dal 2019 ha virato i contenuti verso azioni che mettessero al centro l'utente; in relazione alla sostenibilità ambientale la standardizzazione è già consolidata da decenni.

1.1.1. Standard internazionali

A livello mondiale, esclusivamente tra i 160 paesi che hanno manifestato l'interesse, vigono le norme dell'International Organization for Stan-

dardization (ISO) che regolamentano e definiscono dei principi generici in modo da garantire univoche linee di indirizzo. In ambito internazionale, oltre ai paesi membri dell'UE, sono membri ISO i principali paesi degli altri continenti come il Canada (SCC), l'Argentina (IRAM), il Giappone (JISC), l'Australia (SAI), l'India (BIS). Nonostante siano numerosi i paesi che fanno parte della ISO, ancor oggi vi sono nazioni, quali per esempio la Cina e gli Stati Uniti, che preferiscono adottare sistemi di organizzazione degli standard differenti.

Tra le norme ISO vigenti più conosciute e impiegate per la progettazione del comfort indoor è la ISO 16813:2006 "Building environment design — Indoor environment — General principles" [19] che stabilisce i principi generali della progettazione di un ambiente interno sano per gli occupanti e che garantisca una protezione dell'ambiente per le generazioni future. ISO 16813:2006 è adottabile sia per nuove costruzioni che per il retrofit di edifici esistenti e promuove un approccio in cui le varie parti multidisciplinari coinvolte nella progettazione ambientale degli edifici collaborano tra loro per fornire spazi sostenibili per l'ambiente e per l'uomo allo stesso tempo. Il processo di progettazione deve fornire certi vincoli relativi agli impatti ambientali e sociali sin dalla fase iniziale, analizzando il ciclo di vita dell'edificio insieme ai costi di esercizio. La norma raccomanda, inoltre, di proporre criteri razionali di qualità dell'aria interna, comfort termico, comfort acustico, comfort visivo, efficienza energetica e controlli del sistema HVAC in ogni fase del processo di progettazione.

La legislazione inerente alla fase di indagine e valutazione del comfort indoor negli edifici esistenti è molto discussa e presente nel panorama normativo internazionale. Si ricorda la ISO 21929:2011, "Sustainability in building construction – Sustainability indicators" [20], che stabilisce una serie di indicatori di base per valutare le prestazioni di sostenibilità di edifici nuovi o esistenti, in relazione alla loro progettazione, costruzione, funzionamento, manutenzione, ristrutturazione e fine vita. ISO 21929:2011 segue i principi stabiliti dalla famiglia di norme internazionali che include la ISO 14020 (Etichette e Dichiarazioni ecologiche), ISO 14021 (Auto-dichiarazione ambientale dei prodotti), ISO 14024 (Etichettatura Ambientale di tipo I) e ISO 14025 (Dichiarazione Ambientale di Prodotto). Laddove siano necessari indicazioni più specifiche la ISO 21929:2011 ha una prevalenza.

Altresì nell'ambito d'indagine, la norma ISO 28802:2012 "Ergonomics of the physical environment – assessment of environments by means of an environmental survey involving physical measurements of the environment and subjective responses of people" [21] fornisce un metodo di osservazione ambientale per la valutazione del comfort e benessere degli occupanti degli ambienti interni ed esterni, con precise indicazioni sulla progettazione della campagna di indagine, nonché sulle misurazioni ambientali utilizzate per quantificare l'ambiente e i metodi di valutazione soggettiva utilizzati per accertare la risposta degli occupanti ad un determinato ambiente. La norma applica principi generali non fornendo indicazioni su specifiche tipologie di ambiente e quindi, non tiene in con-

siderazione delle variabili dipendenti da caratteristiche particolari che potrebbero incidere fortemente sull'esito della valutazione. Le indicazioni riguardano la valutazione dell'ambiente termico, acustico, visivo e illuminato, la qualità dell'aria e altri fattori in grado di influenzare il comfort e il benessere degli occupanti di un ambiente confinato.

Appartenente allo stesso gruppo di norme, la ISO 28803:2012 "Ergonomics of the physical environment — application of international standards to people with special requirements" [22] applica l'ergonomia dell'ambiente fisico a persone con requisiti speciali. La norma è stata redatta secondo i principi di accessibilità forniti nella guida ISO/IEC 71:2014 [23] e utilizzando i dati forniti in ISO/TR 22411:2021 [24]. Anche in questo caso, le indicazioni non sono limitate ad un ambiente specifico, ma forniscono i principi generali che consentono la valutazione di ambienti costruiti interni ed esterni. Il riferimento è sempre alla valutazione di ambienti acustici, termici, visivi e della qualità dell'aria con la particolare attenzione a requisiti che rispondono a bisogni speciali di neonati, bambini, uomini o donne con disabilità temporanea o permanente.

Le norme generali rimandano a quelle specifiche per tipologia di comfort da valutare. Il riferimento per il comfort termo-igrometrico è la norma ISO 7730:2005 "Ergonomics of the thermal environment analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria" [25]. ISO 7730:2005 presenta metodi per prevedere la sensazione

termica generale e il grado di disagio (insoddisfazione termica) delle persone esposte ad ambienti termici moderati. Consente la determinazione analitica e l'interpretazione del comfort termico mediante il calcolo del PMV (voto medio previsto) e PPD (percentuale prevista di insoddisfazione) e del comfort termico locale, fornendo le condizioni ambientali ritenute accettabili per il comfort termico generale e quelle che rappresentano il disagio locale.

Riguardo la qualità dell'aria si ricordano la norma ISO 16000:2014 "Series of International Standards on measurement of indoor air quality parameters" [26] e lo standard internazionale per la misurazione dei parametri indoor, quest'ultimo redatto sotto il mandato del comitato tecnico ISO TC 146 [27]. Il comitato tecnico ha pubblicato 32 standard per la misurazione di differenti inquinanti stabilendone per ciascuno le strategie di indagine, compreso il calcolo delle emissioni chimiche, fisiche o biologiche. Ad esempio, la ISO 16000-30:2014 specifica i test sensoriali per la valutazione e quantificazione degli odori interni; per ricercare la causa degli odori, invece, è consigliabile condurre ulteriori test di laboratorio su campioni di componenti secondo la norma ISO 16000-

La valutazione del comfort visivo è standardizzata dalla norma ISO 19454:2019 "Building environment design — indoor environment — daylight opening design for sustainability principles in visual environment" [28], documento che assegna i requisiti minimi per le chiusure trasparenti dell'involucro al fine di garantire il comfort visivo degli utenti e allo stesso tempo perseguire il principio di sostenibilità dell'am-

biente illuminando con luce naturale. La norma guida al calcolo della durata del sole all'interno dell'edificio, del rapporto di chiusure trasparenti rispetto alla superficie della parete e alla superficie calpestabile di un locale abitabile; dei livelli adeguati di luce diurna interna in base alle esigenze visive umane e all'entità della luce solare; dei sistemi di controllo della luce diurna nell'edificio; dell'apporto della luce naturale sul guadagno termico ed efficienza energetica.

In relazione al comfort acustico la norma ISO 22955:2021 "Acoustic quality of open office spaces" [29] fornisce una guida tecnica per raggiungere la qualità sonora degli spazi indoor per supportare il dialogo anche negli spazi di lavoro open space. Il documento si applica a progetti di retrofit di edifici esistenti e a progetti per nuovi spazi. La norma ISO 717-1:2013 "Acoustics — Rating of sound insulation in buildings and of building elements" [30] definisce le grandezze univoche per l'isolamento acustico negli edifici, con specifici intervalli dei livelli di fonoassorbimento degli elementi costruttivi quali pareti, pavimenti, porte e finestre, considerando i diversi spettri di livello sonoro di varie sorgenti di rumore. Per la determinazione di tali grandezze sono descritte le modalità di misurazione dei parametri sonori effettuate in bande di terzi d'ottava o d'ottava secondo le norme ISO 10140-2, ISO 140-4 e ISO 140-5. La norma richiama anche la ISO 11654:1997 "Acoustics — Sound absorbers for use in buildings — Rating of sound absorption" [31] che valuta la qualità degli elementi fonoassorbenti negli edifici e che descrive una forma speciale di conversione ponderata dei coefficienti di assorbimento

misurati secondo la norma ISO 354; tale conversione favorisce l'assorbimento intorno alla banda di frequenza 500 Hz e discrimina la banda di frequenza 125 Hz. Si ricordano, infine, gli standard ISO 3382-1:2009 "Acoustics – Measurement of room acoustic parameters" [32] e il successivo ISO 12354-1:2017 "Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements" [33]. Il primo descrive più generalmente diverse modalità di misurazione dei parametri acustici di un ambiente confinato, inclusa la potenza sonora e descrive possibili metodi di valutazione dei dati, proponendo un esempio di formulazione del rapporto di prova; il secondo stima le prestazioni di isolamento acustico dell'involucro edilizio e il tempo di riverbero in ambienti chiusi, basandosi sul metodo di calcolo Wallace Clement Sabine [34].

Il gruppo di norme "Sustainability in buildings and civil engineering works", con disposizioni emesse negli anni dal 2013 al 2022, coniuga il comfort indoor all'efficienza energetica degli spazi confinati. La norma ISO/TR 21932:2013 [35] fornisce una raccolta di termini e definizioni di concetti relativi sia all'uso sostenibile di un edificio o di opere di ingegneria civile, sia all'effetto di tali opere sullo sviluppo sostenibile, come applicato nei documenti della ISO/TC 59/SC 17 [36]. Quest'ultima è l'emblema della standardizzazione nel campo della sostenibilità delle opere edili nuove ed esistenti nel contesto degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile delle Nazioni Unite. Nello stesso gruppo la ISO/TS 21929:2015 "Sustainability in building construction — Sustainability indicators" [37] stabilisce un

elenco di aspetti e impatti che dovrebbero essere presi come base per lo sviluppo di indicatori di sostenibilità per valutare le prestazioni di edifici nuovi o esistenti durante il ciclo di vita dell'edificio. Anche la norma ISO 15392:2019 [38] si riferisce al ciclo di vita dell'edificio, ma in chiave differente: stabilisce i principi di valutazione del contributo di edifici allo sviluppo sostenibile, applicando il metodo del Life Cycle Assessment per i materiali, i prodotti, i servizi e i processi della costruzione. Infine, la norma ISO 21931:2022 "Framework for methods of assessment of the environmental, social and economic performance of construction works as a basis for sustainability assessment" [39] descrive un quadro generale per migliorare la qualità e la comparabilità dei metodi di valutazione delle prestazioni ambientali, sociali ed economiche delle opere edili.

1.1.2. Standard americani

Gli Stati Uniti presentano una situazione settorializzata e decentralizzata rispetto alle norme ISO. La normativa fa riferimento ad un istituto centrale di amministrazione e coordinamento, l'American National Standards Institute (ANSI), che opera per mezzo di singole e distinte organizzazioni che sviluppano le norme: Standards Developing Organizations (SDO). Le norme americane elaborate dalle SDO sono spesso prese come riferimento dai mercati internazionali, in concorrenza con quelle ISO. Nel settore del comfort indoor degli edifici la normativa di riferimento è emessa dall'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning

Engineers (ASHRAE), ente internazionale che standardizza gli elementi, i sistemi e i processi nei campi del riscaldamento, della ventilazione, del condizionamento dell'aria e della refrigerazione, sviluppando norme tecniche per migliorare la qualità indoor degli edifici e l'efficientamento energetico in linea con gli obiettivi ONU di sviluppo sostenibile. Le norme vigenti sono costantemente revisionate e aggiornate.

Tra gli standard più applicati, nell'ambito del comfort termico è ANSI/ASHRAE 55-2013 "Thermal environmental conditions for human occupancy" [40] che specifica le condizioni per ambienti termici accettabili, indicando le specifiche tecniche per l'uso, la progettazione, il funzionamento e la messa in servizio di sistemi attivi e passivi per il comfort termico negli edifici. L'edizione 2020 guida gli utenti verso un metodo di calcolo analitico, consentendo una maggiore flessibilità e precisione rispetto ai metodi grafici conosciuti. La norma include un modello adattivo per determinare le condizioni termiche accettabili in spazi condizionati naturalmente e controllati dagli occupanti.

Per gli ambienti controllati meccanicamente le linee guida ANSI/ASHRAE 36-2021 "High-Performance Sequences of Operation for HVAC Systems" [41] standardizzano le migliori sequenze di controllo HVAC, secondo il principio del consumo energetico e specificando tipologie di sistemi più resilienti. Con riferimento al comfort igrometrico ANSI/ASHRAE Standard 160-2016 "Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings" [42] specifica i criteri di progettazione incentrati sulla mitigazione dei danni causati dall'umidità

rispetto ai materiali, ai componenti, ai sistemi e agli arredi, a seconda del clima, del tipo di costruzione e del funzionamento del sistema HVAC. Sono perseguiti gli obiettivi di: limitare l'umidità relativa interna al 70%; semplificare la procedura di calcolo per la pioggia battente e il calcolo dell'indice di muffa che procurano un rischio sia per l'edificio che per gli occupanti. Più generico, lo standard ANSI/ASHRAE Guideline 10-2011 "Interactions Affecting The Achievement Of Acceptable Indoor Environments" [43] fornisce indicazioni sui fattori relativi a comfort termico, qualità dell'aria, suono e vibrazioni e illuminazione e le loro interazioni rispetto alla misura in cui influenzano le condizioni ambientali interne accettabili per il comfort e la salute degli occupanti.

Riguardo la qualità dell'aria ANSI/ASHRAE Standard 1-2019 "Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality" [44] e ANSI/ASHRAE Standard 2-2019 "Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings" [45] sono gli standard riconosciuti per la progettazione del sistema di ventilazione per una qualità dell'aria interna (IAQ) accettabile; sono specificati i tassi di ventilazione minimi e altre misure al fine di ridurre al minimo gli effetti negativi sulla salute degli occupanti. Più incentrato per il miglioramento della IAQ negli edifici esistenti è lo Standard 1.

ANSI/ASHRAE Standard 1-2019 "Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings" [46] detta i requisiti minimi di efficienza energetica per la progettazione e la costruzione di nuovi edifici e relativi sistemi e nuovi sistemi e apparecchiature negli edifici

esistenti, nonché criteri per determinare la conformità a tali requisiti. Lo standard 1 è stato un punto di riferimento per i codici energetici degli edifici commerciali negli Stati Uniti.

Lo Standard ANSI/ASHRAE 100-2015 "Energy Efficiency in Existing Buildings" [47] è la guida più ampia e completa per il retrofit degli edifici esistenti. Sono descritte le procedure per raggiungere un certo target di efficienza energetica e gli obiettivi in fase di adeguamento secondo diversi livelli di conformità. Stabilisce la necessità di elaborare un piano di gestione dell'energia e un programma operativo di manutenzione, pur riconoscendo che l'effettiva occupazione dell'edificio gioca un ruolo chiave nelle sue prestazioni; sono inclusi i criteri per l'audit sull'uso dell'energia e le procedure di analisi dei costi del ciclo di vita e per l'identificazione di potenziali misure di risparmio energetico.

ANSI/ASHRAE 169-2021 "Climatic Data for Building Design Standards" [48], è una fonte completa per una varietà di informazioni climatiche utilizzate nella progettazione, pianificazione e dimensionamento dei sistemi energetici e delle apparecchiature degli edifici. La norma si correda di un manuale "Handbook of Smoke Control Engineering" che raccoglie le informazioni sulla progettazione climatica e altri dati sviluppati specificamente secondo lo standard ASHRAE RP-1847, includendo dati per 9237 località in tutto il mondo [49].

Infine, nell'ambito, ANSI/ASHRAE Standard 34-2019 "Designation and Safety Classification of Refrigerants" [50] stabilisce procedure per il funzionamento di apparecchiature e sistemi

refrigeranti e assegna classificazioni di sicurezza basate su dati di tossicità e infiammabilità; guida la scelta dei sistemi specificando i requisiti minimi, la carica di refrigerante massima consentita, gli accessori e le tubazioni di interconnessione, in modo che, in caso di rilascio completo della carica di refrigerante, la concentrazione nello spazio rimanga al di sotto del limite inferiore di infiammabilità.

In relazione al comfort acustico la normativa di riferimento è emessa dall'American Society for Testing and Materials (ASTM). Lo standard ASTM E1414/E1414M-21 [51] delinea il metodo di prova per l'attenuazione del suono tra ambienti adiacenti; descrive il metodo di prova in situ e in laboratorio per valutare l'attenuazione del suono attraverso diverse tipologie costruttive dell'involucro edilizio (con intercapedini, isolanti, ecc.). La norma suggerisce metodi di valutazione che simulino le condizioni costruttive tipiche e prescrive particolari accorgimenti progettuali che isolano il percorso di trasmissione del suono. Si ricorda, anche, ASTM C 423 -22 [52] che raccomanda il metodo di calcolo dell'assorbimento acustico dell'ambiente mediante il metodo della camera di riverbero. Norma che ha diverse analogie con la ISO 354 [53] fornendo in più una guida per la valutazione dell'assorbimento mediante misurazioni sul campo.

1.2 Panorama legislativo europeo e italiano

Per il comfort indoor degli edifici la legislazione tecnica di riferimento è standardizzata dall'UNI – Ente Nazionale Italiano di Unifi-

cazione. Le norme sono identificate da sigle che richiamano l'Ente primo che ha elaborato la norma e il livello di validità. EN indica le norme elaborate dal CEN (Comité Européen de Normalisation) e devono essere obbligatoriamente recepite dai Paesi membri CEN; ISO individua le norme elaborate dall'ISO (International Organization for Standardization) e rappresentano un riferimento necessario per armonizzare la legislazione internazionale. Ogni Paese può decidere se adottarle come proprie norme nazionali. In sede di normazione europea CEN è stata costituita, su mandato della Commissione Europea del 2004, la Commissione Tecnica CEN/TC 350 "Sustainability of construction work" [54] per la standardizzazione nel campo delle prestazioni ambientali degli edifici.

Il principale riferimento per la valutazione del comfort indoor termico, visivo e acustico e della qualità dell'aria negli edifici è la norma UNI EN 16798 nelle sue Parti 1 e 2, pubblicate rispettivamente nel 2019 e nel 2020. Entrambe le norme UNI EN 16798-1:2019 "Prestazione energetica degli edifici – Ventilazione per gli edifici – Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica" [55] e UNI CEN/TR 16798-2:2020 "Prestazioni energetiche degli edifici – Ventilazione per gli edifici – Parte 2: Interpretazione dei requisiti della norma EN 16798-1" [56] coniugano i parametri IAQ e i fattori di comfort al calcolo energetico globale dell'edificio e costituiscono le prime due

parti di una serie di norme concepita in 18 parti ed emessa nel 2015.

La Parte 1 costituisce un aggiornamento della norma EN 15251:2008 “Parametri di input relativi all’ambiente interno” [57], non più in vigore. Tale norma differenziava il comfort negli ambienti con ventilazione meccanica in tre categorie (la normativa nuova ne prevede quattro) e presentava diverse questioni, discusse dalla comunità scientifica, legate principalmente alla mancata standardizzazione del comportamento degli occupanti nell’edificio (attività, emissione suoni, controllo della temperatura e delle schermature solari, tempo di occupazione, ecc.) che in verità ha un’influenza significativa sul consumo di energia negli edifici.

Con la nuova norma, i criteri predefiniti sono forniti per quattro categorie che dipendono dall’uso degli spazi o da esigenze di gruppi di occupanti (ricondotti ad una specifica categoria) e sono definiti i valori minimi e massimi dei parametri, in base alle condizioni climatiche, alla temperatura dei locali e al tipo di utilizzo. La norma invita, infatti, a specificare i profili di occupazione da utilizzare nei calcoli di energia standard e in conseguenza a definire i criteri relativi alla specifica categoria di riferimento; non sono però specificati i metodi di progettazione, ma sono forniti gli input per la progettazione dell’involucro edilizio e dei sistemi di riscaldamento, raffreddamento, ventilazione, illuminazione e isolamento acustico.

Il rapporto tecnico (Parte 2) illustra come utilizzare la norma UNI EN 16798-1, specificando i parametri dell’ambiente indoor come input per la progettazione del comfort e per il calcolo

delle prestazioni energetiche. Il documento specifica, inoltre, i metodi per il monitoraggio delle condizioni ambientali a lungo termine e i criteri per le misurazioni. Per la pianificazione, la progettazione e il funzionamento efficiente dal punto di vista energetico degli edifici, si applicano le Parti 3 e 4 della UNI EN 16798, inerente alla progettazione di sistemi di ventilazione e di condizionamento degli ambienti in edifici non residenziali. La Parte 3 recepisce i contenuti della norma UNI EN 13779:2008 “Ventilazione degli edifici non residenziali – Requisiti di prestazione per i sistemi di ventilazione e di climatizzazione” [58], includendo anche nuovi requisiti per le apparecchiature e la tecnologia di sistema per filtri dell’aria, recupero di calore e qualità dell’aria di alimentazione. Specifica, inoltre, come gli impianti HVAC possano influire sul clima termo-igrometrico negli ambienti indoor, sulla qualità dell’aria interna, sull’acustica e che il controllo dell’umidità nell’aria ambiente è obbligatorio per escludere la possibilità che si formi della condensa, stabilendo una relazione con la Parte 1 per quanto concerne la ventilazione e la qualità dell’aria.

Le Parti 5-16 trattano vari metodi di calcolo relativi ai sistemi di ventilazione meccanica, inclusi riscaldamento, raffreddamento e distribuzione, sostituendo le precedenti norme UE 15241, 15242 e 152 Le norme UNI CEN/TR 16798-18:2018 [59] e EN 16798-17:2017 [60] sono le linee guida per l’ispezione dei sistemi di ventilazione e condizionamento dell’aria. La norma UNI EN 16798 richiama costantemente le specifiche norme tecniche, seppur precedenti ma ancora in vigore, per ciascun ambito di studio.

La valutazione delle prestazioni dell'edificio in funzione al comfort indoor è costantemente associata alla valutazione della prestazione energetica dell'edificio, in particolare le Direttive sulla prestazione energetica nell'edilizia (EPBD) correlano nei metodi di indagine e progettazione del sistema edilizio le due questioni, mostrandone una loro complementarità e talvolta subordinazione.

La direttiva EPBD mira a promuovere il miglioramento della prestazione energetica degli edifici all'interno dell'Unione Europea, tenendo conto delle condizioni climatiche e locali esterne, nonché dei requisiti climatici interni e dell'economicità (Art. 1) [61]. La prima versione dell'EPBD è la Direttiva 2002/91/CE [62], successivamente rivista, è stata sostituita nel 2018 con la Direttiva 2018/844/UE [63] i cui principi hanno alla base gli standard internazionali EPB (Energy Performance of Buildings), che mirano all'armonizzazione internazionale della metodologia per la valutazione della EPB e sono sviluppati nel 2018 nell'ambito del mandato M/480 conferito al Comitato Europeo di Normalizzazione (CEN): ISO 52000-1, 52003-1, 52010-1, 52016-1 e 52018-1.

Nell'ultima revisione della EPBD, dicembre 2021, la Commissione Europea stabilisce misure volte a raddoppiare almeno il tasso annuo di rinnovamento energetico entro il 2030 e aggiorna il quadro normativo esistente per riflettere le esigenze più urgenti in materia di clima e azione sociale [64]. I cinque standard EPB descrivono un quadro generale della valutazione della prestazione energetica degli edifici (isolamento termico, tenuta all'aria e ventilazione, massa dell'edificio, carico termico solare ed

energia solare passiva e guadagni di calore interni, ecc.), impostata sulla concezione tecnologica sistemica dell'edificio, fornendo indicatori, requisiti e rating EPB. Includono anche alcune possibili etichette EPB ed elencano i diversi passaggi da intraprendere quando si stabilisce uno schema di certificazione EPB.

In relazione al comfort indoor, in particolare lo standard EN ISO 52010-1 [65] raccomanda procedure per valutare i dati climatici necessari come input per molti elementi del sistema edilizio nei calcoli delle prestazioni termo-igrometriche e dell'illuminazione diurna, ma anche come condizione al contorno per le prestazioni di specifici sistemi di ventilazione. Il principale elemento della norma è il calcolo dell'irradianza solare e la conversione di questa in illuminamento. L'irradianza solare e l'illuminamento sono dati di ingresso per i calcoli di energia e dello sfruttamento della luce naturale. Lo standard EN ISO 52016-1 [66] fornisce le procedure per calcolare le temperature interne, i carichi termici sensibili e latenti (su base oraria) e il fabbisogno energetico per il soddisfacimento del comfort termico, nonché le prestazioni degli elementi tecnologici in risposta agli input di temperatura normati; ad esempio, in appendice si riscontra la modalità di valutazione del comportamento termico dinamico degli elementi opachi dell'involucro edilizio.

1.2.1. Riferimenti legislativi inerenti il comfort termoigrometrico

Per il comfort termoigrometrico i riferimenti sono la norma UNI EN ISO 7726:2002 [67], sui

parametri e la strumentazione necessaria a valutare il livello di comfort e la UNI EN ISO 7730:2006 [68], relativa al comfort percepito e al calcolo del PMV (Predicted Mean Vote) e del PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied). Similmente allo standard UNI EN 16798-1, la norma UNI EN ISO 7730 classifica la qualità degli ambienti interni in categorie, dalla prima (la classe con i requisiti più elevati) alla quarta (la classe che può essere utilizzata solo per periodi limitati di tempo) e presenta metodi per prevedere la sensazione termica globale ed il grado di disagio (insoddisfazione termica) delle persone esposte in ambienti termici moderati. È spiegata la determinazione analitica e l'interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale, fornendo le condizioni ambientali considerate accettabili per il benessere termico globale. La norma, inoltre, fornisce le caratteristiche minime degli strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche e i metodi per la loro misurazione.

Per la valutazione del rischio negli ambienti severi caldi si può fare riferimento alla norma UNI EN ISO 7243:2017 “Ambienti caldi – valutazione dello stress termico per l'uomo negli ambienti di lavoro” [69], basata sull'indice WBGT (temperatura a bulbo umido e del globo termometro). Nel caso di ambienti in contesti freddi si può fare riferimento alla norma UNI EN ISO 11079: “Ergonomia degli ambienti termici – Determinazione e interpretazione dello stress termico da freddo con l'utilizzo dell'isolamento termico dell'abbigliamento richiesto (IREQ) e degli effetti del raffreddamento locale” [70].

Altre norme facenti parte dell'ambito “Ergonomia degli ambienti termici” aiutano a determinare il livello di benessere termico indoor: UNI EN ISO 8996:2022 “Determinazione del metabolismo energetico” [71]; UNI EN ISO 9920:2009 “Valutazione dell'isolamento termico e della resistenza evaporativa dell'abbigliamento” [72]; UNI EN ISO 11399:2001 “Principi e applicazione delle relative norme internazionali riguardanti l'ergonomia degli ambienti termici” [73].

La prestazione termoigrometrica degli edifici e dei materiali da costruzione è valutabile con l'ausilio della norma UNI EN ISO 9346:2008 “Hygrothermal performance of buildings and building materials – Physical quantities of mass transfer” [74] che definisce le grandezze fisiche nel campo del trasferimento di massa relativo agli elementi e ai sistemi, ai componenti e ai materiali degli edifici. Ciascuna grandezza fisica è identificata secondo corrispondenti simboli e unità di misura. Tale norma fa parte di una serie di norme: UNI EN ISO 7345:2018 “Thermal insulation – Physical quantities and definitions” [75], UNI EN ISO 9251:1998 “Thermal insulation – Heat transfer conditions and properties of materials – Vocabulary” [76] e UNI EN ISO 9288:2000 “Thermal insulation – Heat transfer by radiation – Physical quantities and definitions” [77] che definiscono le grandezze fisiche utilizzate per la prestazione termica degli edifici e dei componenti edilizi e forniscono informazioni sulle condizioni di scambio termico e le proprietà dei materiali, anche con riferimento allo scambio termico per radiazione.

Specifiche per il calcolo del comfort termoigrometrico di componenti e di elementi di un

edificio la norma UNI EN 15026:2008 “Prestazione termoigrometrica – Valutazione del trasferimento di umidità mediante una simulazione numerica” [78] indica le equazioni da utilizzare in un metodo di simulazione per il calcolo del trasferimento in regime dinamico di calore e umidità nelle strutture degli edifici. In continuità, il rapporto tecnico UNI/TR 10349:2016 [79] fornisce, per il territorio italiano, i dati climatici convenzionali necessari per la progettazione delle prestazioni energetiche e termoigrometriche degli edifici, inclusi gli impianti tecnici per la climatizzazione estiva ed invernale. I dati di progetto contenuti nel rapporto tecnico sono rappresentativi delle condizioni climatiche limite, da utilizzare per il dimensionamento degli impianti tecnici per valutare il rischio di surriscaldamento estivo. Raccoglie, inoltre, i metodi per ripartire l’irradianza solare oraria nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l’irradianza solare su di una superficie inclinata e le differenze di temperatura cumulate (gradi giorno) ed altri indici che descrivono in maniera sintetica il clima di una località.

La serie di standard UNI EN ISO 15927:2008 [80], anch’essa relativa alla prestazione termoigrometrica dell’involucro edilizio, si compone di 6 parti emanate negli anni 2005-2009 e richiamate nella precedente Direttiva EPBD 2010/31/UE. Serie che associa i requisiti di consumo energetico degli edifici ai criteri utili per il comfort dell’ambiente termo-igrometrico interno (riscaldamento, raffreddamento, ventilazione) e progettazione e funzionamento degli edifici (compresi i sistemi). Indica la mi-

sura dei dati climatici dei singoli elementi meteorologici (temperatura dell’aria, umidità atmosferica, velocità del vento, precipitazioni, radiazione solare, radiazione ad onda lunga), parametri necessari per valutare alcuni aspetti delle prestazioni termiche e igrometriche degli edifici; definisce il calcolo dei dati per il carico termico di progetto per il riscaldamento degli ambienti e dei dati relativi alle differenze di temperatura cumulate (gradi giorno), utili per stimare l’energia utilizzata per il riscaldamento degli edifici.

1.2.2. Riferimenti legislativi inerenti la qualità dell’aria

Uno dei principali riferimenti per la determinazione della qualità dell’aria è la norma UNI 11761:2019 “Emissions and air quality – Odour determination using IOMS (Instrumental Odour Monitoring Systems) and their qualification” [81]. La norma specifica i requisiti tecnici e di gestione di sistemi automatici per il monitoraggio degli odori (IOMS, Instrumental Odour Monitoring System) e per la misurazione periodica degli odori in atmosfera, escludendo però l’impiego di strumenti per i monitoraggi della concentrazione di singoli inquinanti atmosferici, finalizzati alla protezione della salute degli occupanti. Sono considerate tre tipi di determinazioni: presenza/assenza di odore; livello di odore; quantità di odore sopra soglia consentita. La norma rimanda alle disposizioni contenute nelle norme UNI EN 14181:2015 “Emissioni da sorgente fissa – Assicurazione della qualità di sistemi di misurazione automatici”

[82], UNI EN 13725:2004 “Qualità dell’aria – Determinazione della concentrazione di odore mediante olfattometria dinamica” [83], UNI EN 15267-4:2017 “Qualità dell’aria – Certificazione di sistemi di misurazione automatici” [84], UNI EN ISO 9169:2006 “Qualità dell’aria – Definizione e determinazione delle caratteristiche prestazionali di un sistema di misurazione automatico” [85], UNI EN ISO 14956:2004 “Qualità dell’aria – Valutazione dell’idoneità di una procedura di misurazione per confronto con un’incertezza di misura richiesta” [86].

La serie di norme UNI EN ISO 16000 “Aria in ambienti confinati” [87], si compone di 34 parti pubblicate fino al 2018 e ha l’obiettivo di aiutare la pianificazione del monitoraggio dell’inquinamento in ambienti indoor. La norma fornisce un metodo di valutazione della concentrazione di particelle sospese nell’aria e per identificare le sorgenti inquinanti o altri fattori nocivi negli edifici, specifica il campionamento e l’analisi degli inquinanti nella polvere domestica e nei campioni di superficie. I risultati delle indagini forniscono la base per valutare l’edificio rispetto all’utilizzo, comprendendo i parametri di igiene e benessere. La norma specifica un metodo di prova per il campionamento mediante test olfattivi, gas cromatografia/spettrometria di massa, rivelatori di COV e CO₂, procedure di valutazione per la determinazione degli odori emessi da prodotti e materiali da costruzione, compresi il tempo di risposta, la stabilità degli inquinanti e il campo di misura.

Le prestazioni del materiale, rispetto alla sua capacità di ridurre la concentrazione di COV nell’aria interna, vengono valutate misurando

il tasso di riduzione specifico per area e la massa di saturazione per area. Il primo indica direttamente le prestazioni materiali rispetto alla riduzione degli inquinanti in un determinato momento; l’altro riguarda la capacità di mantenere tale prestazione. Per la determinazione del flusso, specifico per superficie, di emissione di composti organici volatili da prodotti da costruzione sono definite le prove da effettuare in laboratorio.

Per la determinazione della quantità di composti inquinanti rilasciata dai prodotti di costruzione il riferimento più attuale è la norma UNI EN 16516:2020 “Prodotti da costruzione: Valutazione del rilascio di sostanze pericolose – Determinazione di emissioni nell’aria interna” [88], che descrive un metodo di laboratorio basato sull’utilizzo di una camera di prova e l’analisi dei composti organici tramite GC-MS (gascromatografia) o HPLC (cromatografia liquida ad alte prestazioni) e attraverso metodo spettrometrico o analitico equivalente.

Caposaldi ancora in vigore, sono la norma UNI ISO 7708:1998 [89] e la UNI 10339:1995 [90]. La prima definisce i criteri di campionamento per le frazioni granulometriche delle particelle che devono essere utilizzate per valutare i possibili effetti sanitari derivanti dall’inalazione di particelle aerodisperse. La seconda fornisce una classificazione degli impianti, la definizione dei requisiti minimi e i valori delle grandezze di riferimento durante il funzionamento per impianti aeraulici destinati al benessere delle persone, comunque installati in edifici chiusi.

Sono numerose le revisioni e le successive proposte sui valori limite indoor, fino alla re-

cente norma UNI EN 16798, tra queste si menziona una proposta, alla base di diversi standard, elaborata dal progetto europeo INDEX (Critical Appraisal of the Setting and Implementation of Indoor Exposure Limits in the EU), finanziato nel 2004 dalla Commissione Europea e coordinato dal Joint Research Centre della Commissione Europea [91]. Lo studio ha individuato la formaldeide, il biossido di azoto, il monossido di carbonio, il benzene e il naftalene come inquinanti prioritari ai fini di una regolamentazione europea, suggerendone i limiti di esposizione, le raccomandazioni e le misure di controllo per minimizzare i rischi per la salute. Raccomanda, inoltre, la limitazione della costruzione di garage annessi e l'isolamento di questi, nonché degli spazi di lavoro; un'adeguata progettazione dei sistemi di ventilazione per garantire la diluizione di tutte le emissioni interne; la sensibilizzazione dell'opinione pubblica sui vari rischi acuti e a lungo termine derivanti dall'esposizione all'inquinamento dell'aria interna.

La serie di norme UNI EN ISO 16890:2017 "Filtri d'aria per ventilazione generale" [92] stabiliscono un sistema di classificazione dell'efficienza dei filtri per ventilazione generale e descrivono le procedure di prova, i requisiti generali per la valutazione e la marcatura dei filtri, l'apparecchiatura per misurare l'efficienza spettrale e la resistenza al flusso d'aria dei filtri.

La norma UNI EN ISO 11844:2020 "Corrosione dei metalli e loro leghe – Classificazione delle atmosfere di interni a bassa corrosività" [93] definisce le categorie di corrosività degli ambienti interni in base all'attacco di corrosio-

ne su provini standard. La norma indica le condizioni di esposizione agli inquinanti e il metodo di valutazione e la misurazione dei parametri ambientali che influenzano la corrosività delle atmosfere di ambienti indoor nei riguardi di metalli e leghe. Infine, nell'ambito, la norma UNI EN 12341:2014 "Aria ambiente – Metodo gravimetrico di riferimento per la determinazione della concentrazione in massa di particolato sospeso PM10 o PM2,5" [94] descrive un metodo di riferimento per la determinazione della concentrazione in massa del particolato sospeso PM10 o PM2,5 nell'aria di un ambiente confinato attraverso la filtrazione e la pesatura di questi in $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

1.2.3 Riferimenti legislativi inerenti il comfort visivo

Per il comfort visivo, oltre alla già descritta norma UNI EN 16798, la UNI EN 12665:2018 "Luce e illuminazione – Termini fondamentali e criteri per i requisiti illuminotecnici" [95] definisce i termini fondamentali per l'uso in tutte le applicazioni illuminotecniche e i requisiti di illuminazione, fornendo i dettagli degli aspetti che devono essere tenuti in considerazione per il mantenimento dei requisiti. La serie di norme EN 15193:2021 "Prestazione energetica degli edifici – Requisiti energetici per illuminazione" [96] si colloca nel set degli standard EN che sono a supporto della Direttiva EPBD e consente la valutazione del fabbisogno energetico imputabile agli impianti di illuminazione artificiale e la determinazione dell'indice LENI (Lighting Energy Numeric Indicator).

La norma ricorda che è possibile ridurre i consumi, non solo attraverso il contributo della luce naturale, ma tenendo conto di due aspetti distinti: l'effettiva presenza di individui nei locali (fattore di occupazione); la presenza di un sistema di controllo ad illuminamento costante. La norma orienta verso una migliore qualità degli impianti, sia per il risparmio energetico, sia per il comfort visivo, ma la procedura proposta per la valutazione non tiene conto delle caratteristiche ottiche delle superfici interne e del contesto esterno in cui si inserisce l'edificio.

La norma UNI EN 12464:2021 "Luce e illuminazione – Illuminazione dei luoghi di lavoro" [97] – Parte 1: Luoghi di lavoro interni, raccomanda i requisiti di illuminazione per persone, in posti di lavoro in interni, che corrispondono alle esigenze di comfort visivo e di prestazione visiva di persone aventi capacità oftalmiche (visive) normali o corrette. Sono considerati tutti i compiti visivi abituali, inclusi quelli che comportano l'utilizzo di attrezzature munite di videotermini.

La norma tecnica UNI CEN/TS 17165:2019 "Luce e illuminazione – Processo di progettazione degli impianti di illuminazione" [98] definisce le fasi del processo di progettazione degli impianti di illuminazione ed elenca gli obiettivi del processo: progettare soluzioni di impianti di illuminazione per ottenere una qualità di illuminazione sostenibile basata sulle raccomandazioni contenute nelle norme applicative di illuminazione pertinenti, per il benessere degli utilizzatori e per un ambiente piacevole; assicurare che i requisiti di illuminazione siano soddisfatti mediante soluzioni energetiche

efficienti (apparecchi di illuminazione e sistemi di controllo) con dati che possano essere usati per i calcoli energetici; elencare informazioni sulle apparecchiature da utilizzare nell'installazione, nell'avviamento, nel funzionamento e nella manutenzione degli impianti di illuminazione nel corso degli anni ed il processo di dismissione; compilare i documenti che definiscono gli impianti di illuminazione progettati.

La norma UNI EN 17037:2022 "Luce diurna negli edifici" [99] definisce gli elementi per raggiungere, per mezzo della luce naturale, una appropriata percezione soggettiva di chiarezza al chiuso e per fornire una visione adeguata e su come limitare l'abbagliamento. Inoltre, vengono fornite raccomandazioni per la durata dell'esposizione alla luce del sole nelle stanze occupate e le metriche utilizzate per la valutazione delle condizioni di illuminazione diurna, nonché i principi di calcolo e verifica, tenuto conto della variabilità della luce diurna nei giorni e nell'anno.

La norma UNI EN ISO 24550:2020 "Ergonomia – Progettazione accessibile – Indicatori luminosi sui prodotti di consumo" [100] specifica i requisiti di progettazione e le raccomandazioni per gli indicatori luminosi, principalmente a LED, presenti su prodotti di consumo destinati agli anziani e alle persone con disabilità visive. La norma UNI EN 14501:2021 "Tende e chiusure oscuranti – Benessere termico e visivo – Caratteristiche prestazionali e classificazione" [101] si applica a tutti i tipi di chiusure oscuranti le cui proprietà incidono sul benessere termico (fattore solare, fattore di trasferimento termico secondario, trasmittan-

za solare diretta), e sul benessere visivo (prestazione oscurante, riservatezza durante la notte, contatto visivo con l'esterno, controllo dell'abbagliamento, utilizzo della luce diurna, resa dei colori).

1.2.4 Riferimenti legislativi inerenti il comfort acustico

Anche per l'acustica l'elenco della normativa di riferimento è corposo, spiccano le norme tecniche come UNI EN ISO 12354:2017 "Acustica degli edifici – Stima delle prestazioni acustiche degli edifici in base alle prestazioni degli elementi" [102] e UNI 11532:2018 "Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati – Metodi di progettazione e tecniche di valutazione" [103].

La norma UNI EN ISO 12354:2017 specifica modelli di calcolo volti a stimare l'isolamento acustico tra ambienti attigui negli edifici, utilizzando principalmente dati che caratterizzano la trasmissione diretta o indiretta da parte di elementi costitutivi e metodi di propagazione del suono. Viene descritto un modello dettagliato per il calcolo in bande di frequenza e la differenza di livello di pressione sonora di una facciata o altra superficie esterna di un edificio. Il calcolo si basa sull'indice fonoisolante dei diversi elementi da cui è costruita la facciata e comprende la trasmissione diretta e laterale. La norma UNI 11532-1:2018 descrive gli aspetti generali che meglio rappresentano la qualità acustica di un ambiente, indicandone i valori di riferimento in relazione alla destinazione d'uso dell'ambiente stesso. La norma EN ISO

10848-5:2020 "Acoustics – Laboratory and field measurement of the flanking transmission for airborne, impact and building service equipment sound between adjoining rooms" [104] elenca i metodi di misurazione per la caratterizzazione in laboratorio della radiazione acustica di un elemento edilizio. La quantità misurata può essere utilizzata come dati di input per i metodi di calcolo previsti dalla norma UNI EN ISO 12354:2017.

La norma UNI 11143:2005 "Acustica – Metodo per la stima dell'impatto e del clima acustico per tipologia di sorgenti" [105] descrive il procedimento per stimare i livelli di rumore previsti per una specifica sorgente o attività definendo le applicazioni di tipo previsionale da adottare e l'approccio metrologico in funzione delle diverse tipologie di sorgenti e dell'ambiente circostante.

La norma UNI EN ISO 16283:2016 "Acustica – Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio" [106] specifica le procedure per determinare l'isolamento acustico di elementi dell'involucro edilizio. I risultati di prova possono essere utilizzati per quantificare, valutare e confrontare il potere fonoisolante in ambienti ammobiliati dove il campo sonoro si può o non si può approssimare ad un campo diffuso. L'isolamento acustico è dipendente dalla frequenza e può essere convertito in un indice di valutazione per caratterizzare la prestazione acustica utilizzando la norma UNI EN ISO 717-1:2021 [107]. Quest'ultima determina gli indici di valutazione delle grandezze per l'isolamento acustico di singoli elementi di un edificio, considerando diversi

spettri di livello acustico di varie sorgenti e prescrivendo delle regole per la determinazione delle grandezze utili in base ai risultati delle misurazioni effettuate per bande di terzo di ottava o di ottava in conformità agli standard ISO 10140-2 e ISO 16283-1.

La norma UNI EN ISO 10140:2021 “Acustica – Misurazione in laboratorio dell’isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio” [108] indica il metodo di laboratorio per la misurazione dell’isolamento acustico di elementi tecnologici quali pareti, solai, porte, finestre, imposte/elementi oscuranti, elementi di facciata, vetrate, piccoli elementi tecnici, come dispositivi per il convogliamento dell’aria, tracce d’impianti, e loro combinazioni, ad esempio pareti e solai con contropareti, controsoffitti e pavimenti galleggianti. La norma UNI EN ISO 10052:2021 “Acustica – Misurazioni in opera dell’isolamento acustico per via aerea, del rumore da calpestio e della rumorosità degli impianti” [109] specifica i metodi di controllo in opera per la misurazione dell’isolamento acustico tra gli ambienti; dell’isolamento da calpestio dei solai; dell’isolamento acustico di facciate; del livello di pressione sonora in ambienti causato dagli impianti. La norma UNI 11367:2010 “Acustica in edilizia – Classificazione acustica delle unità immobiliari – Procedura di valutazione e verifica in opera” [110] definisce i requisiti acustici prestazionali degli edifici e stabilisce una classificazione acustica per l’intera unità immobiliare. La classificazione acustica si basa su misurazioni effettuate e sull’analisi di tutte le fasi che convergono nel processo realizzativo dell’opera.

1.3 Recepimento italiano delle Direttive europee EPBD

L’Accordo tra Ministero della Salute, Regioni e Province autonome del 27/09/2001 riporta le “Linee guida per la tutela e la promozione della salute negli ambienti confinati” [111] nelle quali vengono fornite le indicazioni per la realizzazione di un Programma Nazionale di Prevenzione dell’inquinamento negli ambienti indoor. Le “Linee guida su: microclima, aerazione e illuminazione nei posti di lavoro”, realizzate dal Coordinamento tecnico per la sicurezza nei luoghi di lavoro sono state pubblicate nel 20

La recente normativa italiana in materia di prestazione energetica ed efficienza degli edifici vede due percorsi legislativi paralleli: l’emanazione del D.Lgs. 10 giugno 2020 n. 48 [112] e del D.Lgs. 14 luglio 2020 n. 73 [113]. Entrambi i decreti derivano dalla Legge di Delegazione europea 2018 che contiene le disposizioni di delega necessarie per il recepimento delle Direttive UE 2018/844 e 2012/ Il D.Lgs. 48/2020 attua la Direttiva (UE) 2018/844 che modifica la Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica e la Direttiva 2012/27/UE sull’efficienza energetica in edilizia [114]; apporta modifiche al D.Lgs. n. 192/2005, Decreto che recepì la prima disciplina europea sulla prestazione energetica edifici [115], Direttiva 2002/91/CE (EPBD I), poi abrogata dalla Direttiva 2010/31/UE (EPBD II), la quale fu trasposta nell’ordinamento nazionale dal Decreto-Legge n. 63/20 Il D.Lgs. 73/2020 attua la Direttiva UE 2018/2002 che modifica la

Direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica introdotta in Italia dal D.Lgs 102/2014 [116].

Il recepimento della strategia comunitaria di lungo termine al fine di ottenere un parco immobiliare decarbonizzato e ad alta efficienza energetica entro il 2050 è recepita nel *Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC)*. Il Piano è redatto ai sensi del Regolamento (UE) 2018/1999 e si struttura in cinque linee d'intervento (decarbonizzazione, efficienza e sicurezza energetica, sviluppo del mercato interno dell'energia, ricerca, innovazione e competitività) [117].

Il recepimento ricalca gli obiettivi energetico-climatici comunitari, tesi alla decarbonizzazione dell'economia in una strategia a lungo termine, da qui al 2050 e, in riferimento al patrimonio edilizio, mira a: potenziare le prestazioni energetiche sia di edifici nuovi che esistenti sottoposti a ristrutturazione, definendo requisiti minimi, le strategie nazionali di lungo termine e gli obblighi; definire le modalità di esercizio, conduzione, controllo, ispezione e manutenzione degli impianti termici; perseguire la conoscenza dettagliata del parco immobiliare nazionale, della sua prestazione energetica e dei suoi consumi, attraverso l'implementazione ed il collegamento tra le banche dati, mettendo tali informazioni a disposizione dei cittadini, delle imprese e della pubblica amministrazione. Al fine di conseguire gli obiettivi comunitari, il recepimento prevede le seguenti strategie a lungo termine:

- una ricognizione del parco immobiliare nazionale con annessa diagnosi energetica e la pubblicazione in banche dati;

- l'individuazione di approcci alla ristrutturazione efficace in termini di costi in base al tipo di edificio e alla zona climatica, per la realizzazione di interventi di riqualificazione energetica;
- una rassegna delle politiche e delle azioni in vigore, rivolte ad alleviare la povertà energetica, a promuovere le tecnologie intelligenti, a promuovere le competenze e la formazione nei settori edile e dell'efficienza energetica;
- l'introduzione di un sistema di "passaporto" di ristrutturazione degli edifici che possa agevolare le modalità per l'utilizzo delle strategie fiscali;
- l'integrazione degli interventi di efficientamento energetico degli edifici con gli interventi per la riduzione del rischio sismico e di incendio;
- una stima affidabile del risparmio energetico atteso, nonché dei benefici connessi alla salute, alla sicurezza e alla qualità dell'aria;
- la fissazione di obiettivi indicativi periodici per il 2030, il 2040 e il 2050, ivi incluso il raggiungimento di un tasso annuale di ristrutturazione degli edifici pubblici, al fine del miglioramento della prestazione energetica, pari almeno al 3%, come attuato nel Programma di riqualificazione energetica della Pubblica Amministrazione centrale (PREPAC) [118];
- l'istituzione del Portale Nazionale sulla Prestazione Energetica degli edifici [119], con lo scopo di fornire ai cittadini, alle imprese e alla pubblica amministrazione informazioni sulle migliori pratiche in termini di costi,

e strumenti per migliorare la prestazione energetica degli edifici.

È ampliato il parco degli interventi incentivabili. S'incentivano: l'installazione di punti di ricarica per veicoli elettrici, di impianti solari termici, pompe di calore, impianti geotermici, impianti a biomassa, nuovi e in sostituzione di impianti esistenti, gli interventi di isolamento termico delle superfici opache verticali e orizzontali che interessano l'involucro con un'incidenza superiore al 25% della superficie disperdente lorda dell'edificio. I principali strumenti che promuovono l'uso delle fonti rinnovabili sono già operativi. Si tratta di:

- Ecobonus: detrazione fiscale applicata all'imposta sul reddito, al 50%, al 65% secondo l'intervento e al 110% se vi è un miglioramento di almeno due classi energetiche, erogata in 10 anni;
- Conto Termico: incentivo fiscale dal 20% al 50% della spesa, secondo l'intervento, erogato in due anni;
- Certificati Bianchi: titoli negoziabili tra i distributori di energia elettrica e gas che certificano il conseguimento di efficienza energetica negli usi finali di energia, utile al raggiungimento degli obiettivi obbligatori;
- Contributi ai Comuni: incentivi da 000, per Comuni fino a 5.000 abitanti, a 2000, fino a 2000 abitanti, per l'efficientamento energetico di edifici di proprietà pubblica e sviluppo territoriale sostenibile, compresi interventi in materia di mobilità, adeguamento e messa in sicurezza di scuole, edifici pubblici e patrimonio comunale e per l'abbattimento delle barriere architettoniche.

Al fine di rafforzare le misure, massimizzare i risultati e ottimizzare le risorse, s'intende integrare il meccanismo dell'Ecobonus, del Sismabonus (incentivo per l'adeguamento sismico) e del bonus casa (incentivo per interventi di ristrutturazione edilizia) in un unico meccanismo. Ne deriva che il miglioramento dell'efficienza energetica può essere meglio ottenuto essendo integrato in ogni occasione di ristrutturazione edilizia, insieme alla riqualificazione sismica, impiantistica ed estetica di edifici e quartieri.

Infine, è in fase di predisposizione la disposizione attuativa per la creazione di una sezione specifica nell'ambito del Fondo nazionale dell'Efficienza Energetica (istituito dal Ministero dello Sviluppo Economico per finanziare le suddette strategie fiscali) per la concessione di garanzie agli istituti di credito che erogano mutui a privati cittadini o a condomini per l'esecuzione d'interventi di efficientamento energetico della propria unità immobiliare.

Il recepimento prevede l'obbligo delle seguenti strategie cogenti e soluzioni tecniche:

- di verifica della fattibilità tecnica, funzionale, ambientale ed economica dei sistemi alternativi ad alta efficienza, in fase di progettazione, per la realizzazione di nuovi edifici o per la ristrutturazione importante degli edifici esistenti;
- di integrazione delle fonti rinnovabili negli edifici; nel caso di edifici nuovi o edifici sottoposti a ristrutturazioni rilevanti, gli impianti di produzione di energia termica devono essere progettati e realizzati in modo da garantire il contemporaneo rispetto del-

- la copertura, tramite il ricorso a energia prodotta da impianti alimentati da fonti rinnovabili, del 50% dei consumi previsti;
- di dotazione nei nuovi edifici e negli edifici esistenti, in occasione della sostituzione del generatore di calore, di dispositivi autoregolanti che controllino separatamente la temperatura in ogni vano dell'unità immobiliare;
 - di rispetto dei requisiti minimi relativi al rendimento energetico globale e di verifica in un unico progetto di ristrutturazione dei parametri del benessere termo-igrometrico degli ambienti interni, della sicurezza incendi e dei rischi sismici;
 - d'installazione di punti di ricarica di veicoli elettrici negli edifici dotati di più di dieci posti auto e ai fini del conseguimento del titolo abilitativo edilizio, che sia previsto, per tutti gli edifici, il rispetto dei criteri d'integrazione delle tecnologie per la ricarica dei veicoli elettrici;
 - di sanzione amministrativa in caso di mancata allegazione dell'APE (Attestato di Prestazione Energetica) ai contratti di compravendita immobiliare;
 - di segnalazione, a cura di un tecnico abilitato, dei casi di inefficienza dei sistemi di termoregolazione e contabilizzazione del calore e di mancata attuazione di almeno uno degli interventi di efficienza dichiarate;
 - di rispondenza, per i materiali isolanti, ai criteri minimi ambientali (CAM) [120]: requisiti per il rispetto della sostenibilità ambientale definiti dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare,

tenuto conto del ciclo di vita e della disponibilità di mercato.

Riguardo ai lavori relativi alle opere di recupero del patrimonio edilizio, le strategie di recepimento abrogano l'obbligo di attestare la rispondenza alle prescrizioni in materia di efficienza energetica e uso delle fonti rinnovabili e il maggior spessore degli elementi di chiusura verticali e orizzontali superiori ed inferiori, necessario ad ottenere una riduzione minima del 10% dei limiti di trasmittanza, non è computato in riferimento alle distanze minime tra edifici e dai confini di proprietà e alle altezze massime degli edifici.

Una sezione dei CAM (2.3.5) è interamente dedicata alla qualità ambientale interna. I Criteri Ambientali Minimi (CAM) sono definiti dal DM 24 dicembre 2015d per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici e per la gestione dei cantieri della pubblica amministrazione. Il documento s'inserisce nel Piano d'azione per la sostenibilità ambientale dei consumi della pubblica amministrazione (PANGPP) [121] per ridurre gli impatti ambientali degli interventi di nuova costruzione o ristrutturazione/manutenzione degli edifici e per aumentare il numero di appalti verdi. Il DM 11 gennaio 2017 "Adozione dei criteri ambientali minimi per gli arredi per interni, per l'edilizia e per i prodotti tessili" [122] è l'aggiornamento del DM24/12/ Nella revisione 2021 dei CAM Edilizia è citata la norma UNI EN 16798-1 come riferimento per il comfort termo-igrometrico e la qualità dell'aria.

I CAM definiscono le prestazioni acustiche

che devono essere rispettate, dalla progettazione al collaudo finale della struttura richiamando la norma UNI 11367:2010 rispetto ad una determinata classe minima di accettabilità. Raccomandano, inoltre, che gli ambienti interni devono essere idonei al raggiungimento dei valori indicati per i descrittori acustici riportati nella norma UNI 11532-1:20. In riferimento alle prestazioni di carattere acustico i CAM indicano le specifiche tecniche e i requisiti dei prodotti per l'isolamento acustico e sono fornite le linee guida per l'effettiva verifica della conformità delle prestazioni ai sensi dei requisiti previste dalle suddette norme.

In relazione al confort visivo i CAM raccomandano un fattore medio di luce diurna $>2\%$, facendo salvo quanto previsto dalle norme vigenti su specifiche tipologie edilizie e facendo salvi gli interventi di ristrutturazione edilizia o restauro conservativo per i quali è prevista la conservazione ai sensi del D.Lgs 42/2004 [123]. I CAM forniscono indicazioni utili alla facilitazione dell'illuminamento con luce naturale quali l'orientamento della zona giorno; schermature delle chiusure trasparenti; dispositivi per il direzionamento della luce e/o per il controllo dell'abbagliamento. Per i dispositivi di protezione solare si rimanda alla norma UNI EN 14501:20. I CAM stabiliscono l'uso corrente di aerazione naturale diretta in tutti i locali anche se l'occupazione può avvenire per intervalli temporali ridotti (richiamando le norme igienico-sanitarie, almeno 1/8 della superficie calpestabile). Il numero di ricambi deve essere quello previsto dalle norme UNI EN 10339:1995 e UNI EN 13779:2008 [124]. In caso di impiantamento di ventilazione meccanica è richiamata la norma UNI EN 15251:2008, raccomandando di limitare la dispersione termica, il rumore, il consumo di energia, l'ingresso dall'esterno di agenti inquinanti; di recuperare il calore statico e/o la regolazione del livello di umidità dell'aria e/o un ciclo termodinamico a doppio flusso per il recupero dell'energia contenuta nell'aria estratta per trasferirla all'aria immessa (pretrattamento per riscaldamento e raffrescamento dell'aria, già filtrata, da immettere negli ambienti). Altre misure proposte sono inerenti ai limiti di emissione di inquinanti da materiali costituenti l'edificio, la riduzione dell'esposizione indoor a campi magnetici a bassa frequenza (ELF) indotti da quadri elettrici, montanti, dorsali di conduttori etc. e strategie atte a controllare la migrazione di Radon negli ambienti confinati. Infine, al fine di assicurare le condizioni ottimali di benessere termo-igrometrico e di qualità dell'aria interna i CAM suggeriscono la verifica delle condizioni in conformità delle norme ISO 7730:2005 e UNI EN 13788 ai sensi del DM 26 giugno 2015 [125] anche in riferimento a tutti i ponti termici sia per edifici nuovi che per edifici esistenti.

Nota

Tale contributo deriva in parte da esiti di ricerca pubblicati in Nicolini E. (2022), *Comfort indoor, strumenti legislativi*, Quaderni di Legislazione Tecnica - ISSN:1825-7003, pp. 9-20.

Bibliografia

1. Dorizas, P.V.; De Groot, M.; Volt, J. *The inner value of a building – Linking indoor environmental quality and energy performance in building regulation*; Buildings Performance Institute Europe (BPIE): Bruxelles, Belgium, **2018**; pp. 154–196
2. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 16798:2019 Prestazione energetica degli edifici – Ventilazione per gli edifici*, **2019**
3. De Giuli, V.; Da Pos, O.; De Carli, M. *Indoor Environmental Quality and pupil perception in Italian primary schools*. Building and Environment **2012**, vol. 34 n. 6, pp. 549-561
4. Redlich, C. A., Sparer, J., & Cullen, M. R., *Sick-building syndrome*. The Lancet, 349(9057), **1997**; pp. 1013-1016
5. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *ASHRAE Standard 1-2004 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*, **2004**
6. Fanger, P.O. *What is IAQ?. Indoor Air* **2006**, vol. 16, pp. 47-56
7. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 10551:2019 Ergonomia dell'ambiente fisico – Scale di giudizio soggettivo per la valutazione degli ambienti fisici*, **2019**
8. European Ministers of Culture, *Davos Declaration Towards a high-quality Baukultur for Europe*, Office fédéral de la culture Section Patrimoine culturel et monuments historiques, **2018**, https://davosdeclaration-20ch/media/Brochure_Declaration-de-Davos-2018_WEB_2.pdf
9. Niglio, O., *Baukultur e la Dichiarazione di Davos 2018 Per un dialogo tra culture*. EdA Esempi di Architettura Digital Version **2018**, vol. 1, pp. 1-5
10. Architect's Council of Europe (ACE), *Statement presented on 4 May 2019 in Innsbruck (Austria) on the occasion of the ACE conference "How to Achieve Quality in the Built Environment: Quality assurance tools and systems"*, **2019**, https://www.acecae.eu/fileadmin/New_Upload/_15_EU_Project/Creative_Europe/Conference_Quality_2019/Inn_Stat_EN_FINAL.pdf
11. Forte, F., *Qualità architettonica e valutazione: una lettura nel quadro europeo*. Valori e Valutazioni, (23), **2019**; pp. 37-45
12. United Nations, *Sustainable Development Goals*, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>
13. United Nations, *Sustainable Development Goals, Goal 3: Ensure healthy lives and promote well-being for all at all ages*, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/health/>
14. United Nations, *Sustainable Development Goals, Goal 7: Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy*, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/energy/>
15. United Nations, *Sustainable Development Goals, Goal 11: Make cities inclusive, safe, resilient and sustainable*, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/cities/>
16. Lamesta, C., Langella, R., De Fina, M., Brera, F., & Davies, S. C., *Health for all: le strategie dell'Organizzazione Mondiale della Sanità*, Bollettino SIFO, 65(5), **2019**; pp. 323-325

17. World Health Organization, *Health21: the health for all policy framework for the WHO European Region*. World Health Organization. Regional Office for Europe: **1999**
18. Signorelli, C., Capolongo, et. Al., *Documento di indirizzo della Società italiana di igiene (SItI) per una casa sana, sicura e sostenibile*. Epidemiol Prev, 40(3-4), **2016**; pp. 265-270
19. International Organization for Standardization, *ISO 16813:2006 Building environment design — Indoor environment — General principles*, **2006**
20. International Organization for Standardization, *ISO 21929-1:2011 Sustainability in building construction — Sustainability indicators — Part 1: Framework for the development of indicators and a core set of indicators for buildings*, **2011**
21. International Organization for Standardization, *ISO 28802:2012 Ergonomics of the physical environment — Assessment of environments by means of an environmental survey involving physical measurements of the environment and subjective responses of people*, **2012**
22. International Organization for Standardization, *ISO 28803:2012 Ergonomics of the physical environment — Application of International Standards to people with special requirements*, **2012**
23. International Organization for Standardization, *ISO/IEC GUIDE 71:2014 Guide for addressing accessibility in standards*, **2014**
24. International Organization for Standardization, *ISO/TR 22411:2021 Ergonomics data for use in the application of ISO/IEC Guide 71:2014*, **2021**
25. International Organization for Standardization, *ISO 7730:2005 Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*, **2005**
26. International Organization for Standardization, *ISO 16000:2014 Indoor air*, **2014**
27. International Organization for Standardization, *ISO/TC 146 Air quality*, **2010**
28. International Organization for Standardization, *ISO 19454:2019 Building environment design — Indoor environment — Daylight opening design for sustainability principles in visual environment*, **2019**
29. International Organization for Standardization, *ISO 22955:2021 Acoustics — Acoustic quality of open office spaces*, **2021**
30. International Organization for Standardization, *ISO 717-1:2013 Acoustics — Rating of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation*, **2013**
31. International Organization for Standardization, *ISO 11654:1997 Acoustics — Sound absorbers for use in buildings — Rating of sound absorption*, **1997**
32. International Organization for Standardization, *ISO 3382-1:2009 Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 1: Performance spaces*, **2009**
33. International Organization for Standardization, *ISO 12354-1:2017 Building acous-*

- tics — Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements — Part 1: Airborne sound insulation between rooms, 2017*
34. W.C. Sabine, *Collected Papers on Acoustics. Edizione Dover*, New York, **1964**
 35. International Organization for Standardization, *ISO/TR 21932:2013 Sustainability in buildings and civil engineering works — A review of terminology, 2013*
 36. International Organization for Standardization, *ISO/TC 59/SC 17 Sustainability in buildings and civil engineering works, 2018*
 37. International Organization for Standardization, *ISO/TS 21929:2015 Sustainability in building construction — Sustainability indicators, 2015*
 38. International Organization for Standardization, *ISO 15392:2019 Sustainability in buildings and civil engineering works — General principles, 2019*
 39. International Organization for Standardization, *ISO 21931-1:2022 Sustainability in buildings and civil engineering works — Framework for methods of assessment of the environmental, social and economic performance of construction works as a basis for sustainability assessment — Part 1: Buildings, 2022*
 40. American National Standards Institute, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *ANSI/ASHRAE 55-2013 Thermal environmental conditions for human occupancy, 2013*
 41. American National Standards Institute, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *ANSI/ASHRAE 36-2021 High-Performance Sequences of Operation for HVAC Systems, 2021*
 42. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *ANSI/ASHRAE 160-2016 Criteria for Moisture-Control Design Analysis In Buildings, 2016*
 43. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *ASHRAE Guideline 10-2011 Interactions Affecting the Achievement Of Acceptable Indoor Environments, 2011*
 44. American National Standards Institute, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *ANSI/ASHRAE Standard 2-2019 Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings, 2019*
 45. American National Standards Institute, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *ANSI/ASHRAE Standard 1-2019 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, 2019*
 46. American National Standards Institute, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *ANSI/ASHRAE/IES Standard 1-2019 -- Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, 2019*
 47. American National Standards Institute, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *Standard 100-2015 -- Energy Efficiency in Existing Buildings, 2015*
 48. American National Standards Institute,

- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *ASHRAE 169-2021 Standard 169-2021 -- Climatic Data for Building Design Standards, 2021*
49. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *1847-TRP, Updating climatic design information for the 2021 ASHRAE Handbook, Standard 169, and the Handbook of Smoke Control Engineering, 2019*
 50. American National Standards Institute, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *ANSI/ASHRAE Standard 34-2019, Designation and Safety Classification of Refrigerants, 2019*
 51. American Society for Testing and Materials, *ASTM E1414/E1414M-21 Standard Test Method for Airborne Sound Attenuation Between Rooms Sharing a Common Ceiling Plenum, 2021*
 52. American Society for Testing and Materials, *ASTM C423-22 Standard Test Method For Sound Absorption And Sound Absorption Coefficients By The Reverberation Room Method, 2022*
 53. International Organization for Standardization, *ISO 354:2003 Acoustics — Measurement of sound absorption in a reverberation room, 2003*
 54. Comité Européen de Normalisation, *CEN/TC 350 (EN 15643-1:2010)- Sustainability of construction works, 2010*
 55. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 16798-1:2019 Prestazione energetica degli edifici – Ventilazione per gli edifici – Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica, 2019*
 56. Ente Italiano di Normazione, *UNI CEN/TR 16798-2:2020 Prestazioni energetiche degli edifici – Ventilazione per gli edifici – Parte 2: Interpretazione dei requisiti della norma EN 16798-1 – Parametri di input ambientale interno per la progettazione e la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica (Modulo M1-6), 2020*
 57. Ente Italiano di Normazione, *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, 2008*
 58. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 13779:2008 Ventilazione degli edifici non residenziali – Requisiti di prestazione per i sistemi di ventilazione e di climatizzazione, 2008*
 59. Ente Italiano di Normazione, *UNI CEN/TR 16798-18:2018 Prestazione energetica degli edifici – Ventilazione per gli edifici – Parte 18: Interpretazione dei requisiti nella EN 16798-17 – Linee guida per l'ispezione dei sistemi di ventilazione e condiziona-*

- mento dell'aria (Moduli M4-11, M6-11, M7-11), 2018*
60. Comité Européen de Normalisation, *EN 16798-17:2017 Energy performance of buildings – Ventilation for buildings – Part 17: Guidelines for inspection of ventilation and air conditioning systems (Module M4-11, M5-11, M6-11, M7-11), 2017*
 61. Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, *Direttiva 2010/31/UE del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione)*, Gazzetta ufficiale dell'Unione europea L 153/13, **2010**
 62. Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, *Direttiva 2002/91/CE del 16 dicembre 2002 sul rendimento energetico nell'edilizia*, Gazzetta ufficiale dell'Unione europea L 1/65, **2012**
 63. Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, *Direttiva 2018/844 del 30 maggio 2018 che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica*, Gazzetta ufficiale dell'Unione europea L 156/75, **2018**
 64. European Commission, *Proposta di Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione)*, del 15 Dicembre 2021 COM (2021) 802 final <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021PC0802&from=EN>
 65. Comité Européen de Normalisation, *ISO 52010-1:2017 Energy performance of buildings — External climatic conditions, 2017*
 66. Comité Européen de Normalisation, *ISO 52016:2017 Energy performance of buildings — Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads, 2017*
 67. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 7726:2002 Ergonomia degli ambienti termici – Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche, 2002*
 68. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 7730:2006 Ergonomia degli ambienti termici – Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale, 2006*
 69. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 7243:2017 Ergonomia degli ambienti termici – Valutazione dello stress da calore utilizzando l'indice WBGT (temperatura globo del bulbo bagnato), 2017*
 70. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 11079:2008 Ergonomia degli ambienti termici – Determinazione e interpretazione dello stress termico da freddo con l'utilizzo dell'isolamento termico dell'abbigliamento richiesto (IREQ) e degli effetti del raffreddamento locale, 2008*
 71. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 8996:2022 Determinazione del metabolismo energetico, 2022*
 72. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 9920:2009 Ergonomia dell'ambiente termico – Valutazione dell'isolamento termico e della resistenza evaporativa dell'abbigliamento, 2009*
 73. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 11399:2001 Ergonomia degli ambienti ter-*

- mici – Principi e applicazione delle relative norme internazionali, 2001*
74. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 9346:2008 Prestazione termoigrometrica degli edifici e dei materiali da costruzione – Grandezze fisiche per il trasferimento di massa – Vocabolario, 2008*
75. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 7345:2018 Prestazione termica degli edifici e dei componenti edilizi – Grandezze fisiche e definizioni, 2018*
76. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 9251:1998 Isolamento termico – Condizioni di scambio termico e proprietà dei materiali – Vocabolario, 1998*
77. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 9288:2000 Isolamento termico – Scambio termico per radiazione – Grandezze fisiche e definizioni, 2000*
78. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 15026:2008 Prestazione termoigrometrica dei componenti e degli elementi di edificio – Valutazione del trasferimento di umidità mediante una simulazione numerica, 2008*
79. Ente Italiano di Normazione, *UNI/TR 10349:2016 Riscaldamento e raffrescamento degli edifici – Dati climatici, 2016*
80. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 15927:2008 Prestazione termoigrometrica degli edifici – Calcolo e presentazione dei dati climatici, 2008*
81. Ente Italiano di Normazione, *UNI 11761:2019 Emissioni e qualità dell'aria – Determinazione degli odori tramite IOMS (Instrumental Odour Monitoring Systems), 2019*
82. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 14181:2015 Emissioni da sorgente fissa – Assicurazione della qualità di sistemi di misurazione automatici, 2015*
83. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 13725:2004 Qualità dell'aria – Determinazione della concentrazione di odore mediante olfattometria dinamica, 2004*
84. Ente Italiano di Normazione, *EN 15267:2017 Air quality – Certification of automated measuring systems, 2017*
85. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 9169:2006 Qualità dell'aria – Definizione e determinazione delle caratteristiche prestazionali di un sistema di misurazione automatico, 2006*
86. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 14956:2004 Qualità dell'aria – Valutazione dell'idoneità di una procedura di misurazione per confronto con un'incertezza di misura richiesta, 2004*
87. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 16000:2015 Aria in ambienti confinati, 2015*
88. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 16516:20 Prodotti da costruzione – Valutazione del rilascio di sostanze pericolose – Determinazione delle emissioni in ambiente, 2020*
89. Ente Italiano di Normazione, *UNI ISO 7708:1998 Qualità dell'aria – Definizioni delle frazioni granulometriche per il campionamento relativo agli effetti sanitari, 1998*
90. Ente Italiano di Normazione, *UNI 10339:1995 Impianti aeraulici al fine di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole*

- per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura, 1995*
91. European Commission, *The INDEX Project – Critical Appraisal of the Setting and Implementation of Indoor Exposure Limits in the EU*, <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC31622>
 92. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 16890:2017 Filtri d'aria per ventilazione generale, 2017*
 93. Ente Italiano di Normazione, *EN ISO 11844:2020 Corrosion of metals and alloys – Classification of low corrosivity of indoor atmospheres, 2020*
 94. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 12341:2014 Aria ambiente – Metodo gravimetrico di riferimento per la determinazione della concentrazione in massa di particolato sospeso PM10 o PM2,5, 2014*
 95. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 12665:2018 Luce e illuminazione – Termini fondamentali e criteri per i requisiti illuminotecnici, 2018*
 96. Comité Européen de Normalisation, *EN 15193:2017 Energy performance of buildings – Energy requirements for lighting, 2017*
 97. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 12464:2021 Luce e illuminazione – Illuminazione dei posti di lavoro, 2021*
 98. Ente Italiano di Normazione, *UNI CEN/TS 17165:2019 Luce e illuminazione – Processo di progettazione degli impianti di illuminazione, 2019*
 99. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 17037:2022 Luce diurna negli edifici, 2022*
 100. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 24550:2020 Ergonomics – Accessible design – Indicator lights on consumer products, 2020*
 101. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 14501:2021 Tende e chiusure oscuranti – Benessere termico e visivo – Caratteristiche prestazionali e classificazione, 2021*
 102. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 12354:2017 Acustica in edilizia – Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni dei prodotti, 2017*
 103. Ente Italiano di Normazione, *UNI 11532-1:2018 Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati – Metodi di progettazione e tecniche di valutazione – Parte 1: Requisiti generali, 2018*
 104. Comité Européen de Normalisation, *EN ISO 10848:2020 Acoustics — Laboratory and field measurement of the flanking transmission for airborne, impact and building service equipment sound between adjoining rooms, 2020*
 105. Ente Italiano di Normazione, *UNI 11143:2005 Acustica – Metodo per la stima dell'impatto e del clima acustico per tipologia di sorgenti, 2005*
 106. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 16283:2016 Acustica – Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio, 2016*
 107. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 717:2021 Acustica – Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio, 2021*
 108. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 10140:2021 Acustica – Misurazione in la-*

- boratorio dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio, 2021*
109. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 10052:2021 Acustica – Misurazioni in opera dell'isolamento acustico per via aerea, del rumore da calpestio e della rumorosità degli impianti – Metodo di controllo, 2021*
110. Ente Italiano di Normazione, *UNI 11367:2010 Acustica in edilizia – Classificazione acustica delle unità immobiliari – Procedura di valutazione e verifica in opera, 2010*
111. Repubblica Italiana, Conferenza Permanente per i Rapporti tra lo Stato le Regioni e le Province Autonome di Trento e Bolzano, *Accordo 27 settembre 2001 tra il Ministro della salute, le regioni e le province autonome sul documento concernente: "Linee-guida per la tutela e la promozione della salute negli ambienti confinati, GU Serie Generale n.276 del 27-11-2001 – Suppl. Ordinario n. 252, 2001*
112. Repubblica Italiana, *D.Lgs. 10 giugno 2020, n. 48 Attuazione della direttiva (UE) 2018/844 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 30 maggio 2018, che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, GU Serie Generale n.146 del 10-06-2020, 2020*
113. Repubblica Italiana, *D.Lgs. 14 luglio 2020, n. 73 Attuazione della direttiva (UE) 2018/2002 che modifica la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, GU Serie Generale n.175 del 14-07-2020, 2020*
114. Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, *Direttiva 2012/27/UE del 25 ottobre 2012 sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE, Gazzetta ufficiale dell'Unione europea L 315/1, 2012*
115. Repubblica Italiana, *D.Lgs. 19 agosto 2005, n. 192 Attuazione della direttiva (UE) 2018/844, che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, della direttiva 2010/31/UE, sulla prestazione energetica nell'edilizia, e della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia, G.U. 23 settembre 2005, n. 222, 2005*
116. Repubblica Italiana, *D.Lgs. 4 luglio 2014, n. 102 Attuazione della direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE, GU Serie Generale n.165 del 18-07-2014, 2014*
117. Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, *Regolamento (UE) 2018/1999 sulla governance dell'Unione dell'energia e dell'azione per il clima che modifica le direttive (CE) n. 663/2009 e (CE) n. 715/2009 del Parlamento europeo e del Consiglio, le direttive 94/22/CE, 98/70/CE, 2009/31/CE, 2009/73/CE, 2010/31/UE, 2012/27/UE e 2013/30/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, le direttive del Consiglio 2009/119/CE e (UE) 2015/652 e che abroga il regolamento (UE) n. 525/2013 del Parlamento europeo e del Consiglio, Gazzetta ufficiale dell'Unione europea L 328/1, 2018*

118. Repubblica Italiana, Ministero dello Sviluppo Economico e Ministero dell' Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, *D.Lgs. DECRETO 16 settembre 2016 Modalità di attuazione del programma di interventi per il miglioramento della prestazione energetica degli immobili della pubblica amministrazione centrale*, GU Serie Generale n.262 del 09-11-2016, **2016**
119. ENEA, Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile, *Portale Nazionale sulla Prestazione Energetica degli edifici*, <https://pnpe2.enea.it/>
120. Repubblica Italiana, Ministero dell' Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, *DM 11 ottobre 2017 Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici*, GU Serie Generale n.259 del 06-11-2017, **2017**
121. Repubblica Italiana, Ministero dell' Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, *DM 11 aprile 2008 Approvazione del Piano d'azione per la sostenibilità ambientale dei consumi nel settore della pubblica amministrazione*, GU Serie Generale n.107 del 08-05-2008, **2008**
122. Repubblica Italiana, Ministero dello Sviluppo Economico, *DM 11 gennaio 2017 Determinazione degli obiettivi quantitativi nazionali di risparmio energetico che devono essere perseguiti dalle imprese di distribuzione dell'energia elettrica e il gas per gli anni dal 2017 al 2020 e per l'approvazione delle nuove Linee Guida per la preparazione, l'esecuzione e la valutazione dei progetti di efficienza energetica*, GU Serie Generale n.78 del 03-04-2017), **2017**
123. Repubblica Italiana, *Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42 Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 della legge 6 luglio 2002, n. 137*, (G.U. n. 45 del 24 febbraio 2004, s.o. n. 28), **2004**
124. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 13778:2008 Ventilazione degli edifici non residenziali – Requisiti di prestazione per i sistemi di ventilazione e di climatizzazione*, **2008**
125. Repubblica Italiana, Ministero dello Sviluppo Economico, *DM 26 giugno 2015 Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici. (15A05198)*, GU Serie Generale n.162 del 15-07-2015 – Suppl. Ordinario n. 39, **2015**

Capitolo 2

Certificazioni di qualità e comfort indoor per il patrimonio costruito

Chapter 2. Indoor quality and comfort certifications for the built environment

The definition of architectural quality has also affected the entrepreneurial world and the sale strategies for the real estate market. In order to compete in this global market, companies have voluntarily started to adopt building performance certifications, which have gained an increasingly crucial role over time, as a guarantee of reliability and specificity of the building process [1], leading to the development of one or more protocols in several countries (in the world there are 45).

In the certifications proposed in the last decade, IEQ has been assimilated to the concepts of environmental sustainability in buildings, which have then been concretized in the construction phase, through the adoption of new technologies for the improvement of the performance of the building system in terms of environmental comfort. The best-known tools, that

is LEED, BREAAAM, DGNB, etc. [2] classify the performance level of both the new constructions and the pre-existing ones which are subjected to restoration interventions; despite not being compulsory, they have generally supported notable projects and constructions, with a focus on energy performance. This is of course related to the significant economic advantage produced by the consistent energy saving of high-performance buildings. None of the best-known protocols has a specific assessment area focused on social sustainability or, at least, on the human factor [3], even though it is decisive for the attractiveness of a real estate offer. Moreover, the certifications do not consider the substantial differences – demographic, physiological, socio-cultural, etc. – of building users, as they are aimed at fulfilling the needs and expectations of a standard medium user [4].

The following part examines the best-known certification protocols, with a specific focus on those aimed at the evaluation of the users' well-being in their living spaces;

for this purpose, the scope of the study is restricted to in-use residential buildings. A distinction is made between evaluation criteria based on soft data, that is on the analysis of the living space according to user perception, and the protocols BREAAAM and LEED are compared with the more recent WELL, an assessment tool produced by the interdisciplinary collaboration between architecture and clinic medicine researchers, aimed at transforming the built environment according to human health psycho-physical well-being [5]. In the certification protocol WELL, managed by the International WELL Building Institute (IWBI), 97% of the indicators are related to social aspects: this percentage is drastically higher than all the other protocols, which have 30% on average [6].

The "crosswalk" initiative [7], developed by IWBI together with some partners among the main founders of international assessment systems has been significantly praised in the real estate market, as it allows the achievement of a double certification, and has been developed by aligning the WELL system to other protocols. The alignment is obtained through an

equivalence between the criteria of each comparative system. The last alignments have been elaborated by IWBI with the Building Research Establishment (BRE) Global Ltd and the Green Building Council (GBC), choosing the most recent protocols in the market:

- WELL V2 pilot Q1: protocol certified by GBC, managed by IWBI (USA), pilot project;
- LEED v4.1 O+M Existing Buildings: protocol certified and managed by USGBC (USA), 2019 [8];
- BREAAAM International In-Use v6: protocol certified and managed by BRE (UK), 2020 [9].

WELL and LEED protocols share the same certification institute; hence, they have the same structure of prerequisites, credits, and scores.

The analysis of the protocols is carried out with a focus on user perception; for this purpose, for each indicator, it is checked whether the assessment criterion requires quantitative information regarding Building Performance (BP), which can be obtained through observation or instrumental tests, or qualitative information based on users' points of view (User Perception – UP): that is, hard or soft data.

2.1. La IEQ certificata da WELL V2 pilot Q1

WELL Building Standard è la prima certificazione che misura e certifica le caratteristiche di edifici che hanno un impatto sul benessere umano, concentrandosi esclusivamente sui modi in cui gli edifici possano migliorare il comfort dell'utente e in generale la sua salute. Costruito sulle fondamenta pionieristiche della prima versione del WELL v1, WELL v2 è la versione più testata e verificata del WELL Building Standard fino ad oggi. La soddisfazione degli occupanti è l'obiettivo della certificazione ed è raggiungibile oltre da parametri IEQ convenzionali (calore, luce, suono e qualità dell'aria), anche da dimensioni fisiopsicologiche complesse.

Al fine di armonizzare WELL ai principali standard di bioedilizia, l'International WELL Building Institute (IWBI) ha sviluppato dei documenti di "Crosswalks" con il BRE (BREEAM) e l'US Green Building Council (LEED) [10] che identificano le sinergie tra i diversi standard edilizi, semplificando gli sforzi per i progetti che cercano una doppia valutazione mediante il riconoscimento di requisiti equivalenti e allineati. Come le certificazioni LEED e BREEAM, WELL è uno strumento globale utilizzato in più di 50 paesi, ma a differenza delle altre, WELL non presenta un'impostazione della valutazione specifica né per tipologia di progetto (esistente, nuova costruzione) né in funzione della destinazione d'uso. Lo strumento di valutazione è soltanto uno, flessibile e adattabile a qualsiasi costruzione, senza una scorecard fissa: opera su un sistema a punti, con un totale di 110 punti disponibili per progetto. Per l'ottenimento del-

la certificazione vi sono una serie di prerequisiti "precondition parameters" obbligatori e altri, parametri opzionali che il valutatore sceglie a seconda dell'edificio da certificare. Tutti i parametri opzionali hanno valori in punti che definiscono la misura in cui una prestazione dell'edificio risponde ad un'esigenza legata direttamente o indirettamente a quelle chiave di salute e benessere. I progetti che soddisfano tutti i prerequisiti e un certo numero di punti opzionali possono ottenere diversi livelli di certificazione: Silver (50 punti), Gold (60 punti), Platinum (80 punti) [11].

L'obiettivo di salute e benessere, che WELL pone sia per l'utente residente che per quello occasionale, si riscontra declinato sotto diversi aspetti: Aria, Acqua, Nutrizione, Luce, Movimento, Comfort termico, Suono, Materiali, Mente e Comunità.

In tutti gli aspetti emerge come la qualità architettonica della propria abitazione o del proprio ambiente di lavoro è determinante sulla qualità di vita, influenzando fortemente la salute fisica e psicologica dell'utente. Vagliando i parametri obbligatori, un edificio sano dovrebbe, secondo WELL, sempre e indipendentemente se sia pubblico o privato, garantire tutti i livelli di qualità indicate dalle norme internazionali ASHRAE e UNI EN. Si fa riferimento, ad esempio, alla norma europea EN16798 [12] che definisce i requisiti minimi della qualità dell'aria insieme ai parametri ambientali riferiti al comfort termico, all'illuminazione e all'acustica. Per la valutazione di tali parametri, il protocollo WELL fissa un sistema di monitoraggio almeno annuale e rimanda ad altre specifiche norme.

Il comfort termico è accettabile se i valori rispondono a quelli regolati da ASHRAE 55:2013 [13], ISO 7730:2005 [14] or EN 15251:2007 [15]. Per l'illuminazione si fa riferimento a IES Lighting Handbook, EN 12464-1: 2011 [16], ISO 8995-1:2002 [17]. La qualità dell'aria è verificata se nell'edificio è prevista una ventilazione meccanica o naturale, efficace e rispondente anche questa alle indicazioni legislative ed è valutata monitorando costantemente i valori di particolato, gas organici e inorganici, radon. La verifica sulla qualità dell'aria deve essere osservata oltre che in fase di esercizio, anche in un'eventuale fase di cantiere per la quale il piano di manutenzione dell'immobile deve prevedere la costante pulizia di filtri, la limitazione delle polveri e l'uso di materiali e prodotti non nocivi (in particolare privi di amianto, mercurio e piombo).

Come l'aria, anche l'acqua è oggetto costante di test della prestazione, monitorando eventuali contaminanti. I tempi e le modalità delle fasi di controllo dovrebbero essere predisposti un uno specifico programma di gestione che prevenga il rischio di esposizione ai batteri più frequenti. WELL è l'unica certificazione che considera come un progetto di architettura possa influenzare il nutrimento di una persona, dipendendo dalla posizione dell'edificio rispetto a punti vendita di prodotti salutari o se questo dispone di spazi adatti alla coltivazione di prodotti biologici.

La vision è affine a quella del Design Thinking: la sua metodologia incentrata sull'uomo integra le competenze della progettazione con le scienze sociali, con collaborazione multidisciplinare,

mediante un processo iterativo per produrre prodotti, sistemi e servizi innovativi focalizzati sull'utente finale [18]. Rispetto ai comuni standard di certificazione, attenti alla dimensione ambientale della sostenibilità, WELL cambia prospettiva spostando l'interesse dalle prestazioni del sistema tecnologico, agli utenti e alle loro esigenze. Ciò si riscontra, oltre che nella voce nutrimento, in diversi temi che interessano la sfera fisica e psicologica. Riguardo la salute fisica la certificazione è ottenibile solo se il progetto prevede spazi e attrezzature per l'attività fisica e se il progetto migliora il benessere generale attraverso un design ergonomico indirizzato ad un maggior comfort negli ambienti di vita e alla sicurezza sul posto di lavoro.

In riferimento alla salute mentale, il progetto architettonico può contribuire integrando gli spazi verdi all'interno dell'area di pertinenza. In vero, WELL implementa concetti ormai noti da studi iniziati negli anni Ottanta, sugli effetti che la natura induce sul benessere mentale e fisico e che si manifestano sia nel limitare l'esposizione delle persone a condizioni ambientali ostili riducendo la sensazione di affollamento, l'inquinamento acustico e atmosferico sia nel generare effetti di tipo ristorativo che nascono da un panorama significativo che conduce a stati emozionali distensivi. È requisito obbligatorio il coinvolgimento degli stakeholder al momento della pianificazione delle scelte progettuali e in fase di esercizio, incoraggiando la socialità [19]. Ciò dimostrabile mediante un documento di gestione dell'edificio che dettaglia la missione orientata alla consultazione di tutte le parti interessate ovvero, che descriva occa-

sioni, in uno o più spazi comuni, di celebrazione, ad esempio, della cultura, dell'arte e/o del sito. La gestione deve inoltre, prevedere la diffusione di materiale didattico finalizzato a informare gli utenti sui rischi fisici e psicologici che l'uso degli spazi potrebbe comportare e programmare più volte all'anno confronti con gli utenti sulla loro salute e benessere attraverso indagini o focus group [20].

I sondaggi devono indagare almeno i seguenti argomenti: qualità ambientale interna dell'aria, dell'acqua, della luce, del suono e del comfort termico (le domande sul comfort termico riguardano le condizioni di almeno due volte l'anno, una volta durante la stagione di raffreddamento e una volta durante la stagione di riscaldamento); ergonomia ed estetica, manutenzione e pulizia, servizi (accesso agli spazi verdi e attrezzati, opzioni di nutrimento), informazioni generali sull'edificio, informazioni socio-demografiche standard e il tempo trascorso nell'edificio.

Nel condurre la valutazione secondo i parametri opzionali, si può intuire quali sono quelli più indirizzati alle unità abitative o ad altre destinazioni d'uso. Ogni parametro è applicabile sia sull'ambiente costruito che su architet-

ture ancora in stato di progetto. Per avere lo stesso termine di paragone con gli altri standard qui analizzati, si è immaginato di svolgere una valutazione di un ambiente di vita, in un edificio esistente e residenziale. Su n. 84 parametri opzionali previsti in WELL, se ne possono individuare n. 25, focalizzati prevalentemente sull'utente, con un peso che comporta una considerevole incidenza (pari a 49 su un punteggio massimo di 110: circa il 45%) e con molteplici opportunità di coinvolgimento degli stakeholders. I parametri suggeriscono al progettista o site manager molteplici misure che mettono al centro l'utente [21]: la divulgazione, ad esempio, di una biblioteca digitale o fisica che descriva gli impatti termo-igrometrici, della qualità dell'aria interna e dell'acqua sulla salute umana, nonché dei dati in tempo reale sul monitoraggio attivo; misure che favoriscono un corretto nutrimento con consumo di cibo a km0 (forniture per la semina, sistema di irrigazione e attrezzi da giardinaggio).

Si riporta di seguito la tabella di sintesi che raccoglie, per ciascun tema, i parametri obbligatori, privi di un punteggio assegnato. La tabella n. 1 riporta la finalità e il metodo di valutazione per ciascun parametro.

Tabella 1 Precondition parameters of WELL V2 pilot Q1.

Env. Cat.	WELL issue	AIM	Assessment criteria	PB/UP*
Air	A01 Fundamental Air Quality	Ensure a basic level of indoor air quality that contributes to the health and well-being of users.	Monitor fundamental Air Parameters (Particulate matter, organic and inorganic gases, radon)	BP

	A02 Smoke-Free Environment	Deter smoking, minimize occupant exposure to second-hand smoke and reduce smoke pollution.	Smoking and the use of e-cigarettes is prohibited in interior spaces and prohibited on all decks, patios, balconies, rooftops and outdoor galleries.	BP
	A03 Ventilation Effectiveness	Prevent indoor air quality issues through the provision of adequate ventilation.	Projects using mechanical or natural ventilation only meet: EN 15251:2007 or ASHRAE 2-2016 [22].	BP
	A04 Construction Pollution Management	Minimize the introduction of construction-related pollutants into indoor air and protect building products from degradation.	Verify the indoor air quality protect strategies during building renovation such as envelope protection, moisture and dust management, filter replacement, air flush, etc.	BP
Water	W01 Fundamental Water Quality	Limit the presence of sediment and water-borne bacteria levels in water for human contact.	Performance Test of turbidity and coliforms. The water contaminants are monitored at least once per year.	BP
	W02 Water Contaminants	Provide access to drinking water that complies with health-based limits on contaminants.	Performance Test of dissolved metal, organic pollutant, herbicide and pesticide, fertilizer, water additive. The water contaminants are monitored at least once per year.	BP
	W03 Legionella Control	Establish an effective management program that prevents or adequately controls the risk of exposure to Legionella bacteria.	Verify if there is a Legionella Management Plan.	BP
Nourishment	N01 Fruits and Vegetables	Promote the consumption of fruits and vegetables by making fruits and vegetables easily accessible.	Photographic Verification if fruits and vegetables are sold or provided on a daily basis within project boundary.	BP
	N02 Nutritional Transparency	Help individuals make informed food consumption choices through nutritional labeling and information.	Nutritional information and Ingredient labeling are clearly displayed (per meal or item) at point-of-decision on packaging.	BP
Light	L01 Light Exposure and Education	Provide access to indoor light exposure and light education.	Verified by Architectural Drawing if spatial daylight autonomy is achieved for at least 30% of the space. Transparent envelope glazing area is no less than 7% of the floor area. Visible light transmittance (VLT) of envelope glazing is greater than 40%.	BP
	L02 Visual Lighting Design	Provide visual comfort and enhance acuity for all users through electric lighting.	All indoor and outdoor spaces comply with illuminance recommendations specified in: IES Lighting Handbook, EN 12464-1: 2011, ISO 8995-1:2002, GB50034-2013 [23].	BP

Movement	V01 Active Buildings and Communities	To promote movement, physical activity and active living through the design of built spaces.	Verify if there are physical activity spaces and equipment.	BP
	V02 Visual and Physical Ergonomics	Reduce physical strain and injury, improve ergonomic comfort and workplace safety and general well-being through ergonomic design and education.	Verify if projects provide education that is appropriate for users, workstations and type of work being conducted in the space.	BP
Thermal Comfort	T01 Thermal Performance	Ensure that the majority of building users find the thermal environment acceptable.	Verify if projects provide a heating system to meet minimum temperature requirements from ASHRAE 55:2013, ISO 7730:2005 or EN 15251:20	BP
Sound	S01 Sound Mapping	Incorporate strategic planning and mitigation required to prevent general issues of acoustical disturbance from both externally and internally generated noise.	An architectural drawing is provided that indicates the projected background noise level (dBA or NC) and the acoustical performance of walls.	BP
Materials	X01 Fundamental Material Precautions	Reduce or eliminate human exposure to building materials known to be hazardous.	Verify that the materials used are free of asbestos, mercury and lead.	BP
	X02 Hazardous Material Abatement	Reduce or eliminate human exposure to hazardous material ingredient by products from renovation, repair or demolition work.	Verify the existence of asbestos, polychlorinated biphenyl and lead risk management strategies.	BP
	X03 Exterior Materials and Structures	Mitigate environmental contamination and associated hazards resulting from treated outdoor structures and wood-plastic materials.	Examined the quantity of lead present in any synthetic grass and paints.	BP
Mind	M01 Mental Health Promotion	Promote mental health and well-being through a commitment to mental health education, programming and initiatives.	Verify the existence of educational materials or measures (survey and focus group) to support the mental health of users.	UP
	M02 Access to Nature	Support occupant well-being by incorporating the natural environment through interior and exterior design.	Verify if the projects integrate and encourage occupant access to nature within the project boundary	BP

Community	C01 Health and Well-Being Awareness	Promote a deeper understanding of factors that impact human health and well-being.	Verify if to all occupants are offered a digital and/or physical library of health and wellness educational materials	BP
	C02 Integrative Design	Facilitate a collaborative development process and ensure adherence to collective well-being goals.	Verify if projects engage stakeholders upon point of registration in project planning and if incorporate into common spaces celebration of culture and there is a document detailing project's health-oriented mission produced in consultation with stakeholders.	BP/ UP
	C03 Occupant Survey	Establish minimum standards for the evaluation of experience and self-reported health and well-being of building occupants.	Collect feedback from building users on their health and well-being and on topics related to WELL.	UP

*Building Performance (BP) or User Perception (UP)

La possibilità di controllo delle tecnologie è una delle azioni chiave per il benessere dell'utente ed è anche questo parametro di valutazione, riscontrabile in riferimento agli impianti termici (compresa la possibilità di zonizzazione termica) e ai sistemi di oscuramento e illuminazione, compreso il livello di luce, la temperatura e il colore.

Alcuni indicatori, aggiunti nelle versioni più recenti, nascono dalle nuove esigenze di protezione dell'uomo dai rischi di salute, sempre più stringenti e che il recente periodo pandemico ha indotto. Il management del sito può incidere fortemente sulla garanzia di immunità comunitaria, disponendo di un piano strategico che indichi luoghi prossimi nei quali effettuare controlli e vaccini e che stabilisca e comunichi regole per l'utilizzo e la pulizia di strumenti e dispositivi condivisi per tutti gli occupanti con diffusi segnali e indicazioni che educino il

comportamento degli utenti negli spazi comuni. Sono opzionali e contemplati in minima parte (poco meno del 3%) i requisiti di Universal Design [24], nonostante l'ampio spettro normativo internazionale su alcuni degli ambiti interessati, quali, ad esempio, l'abbattimento delle barriere architettoniche.

Sotto un'unica voce WELL raccoglie la valutazione di sistemi finalizzati al facile accesso a tutte le funzioni e gli spazi costruiti, l'uso flessibile dello spazio e l'usabilità, strategie per il wayfinding, che utilizzano il colore, la consistenza e altre informazioni percepibili per supportare gli individui con diverse capacità cognitive, offerta di tecnologia che incorpori le esigenze delle persone con disabilità, messa a disposizione di tutti gli occupanti senza alcun costo. È rimarcata, invece, l'esigenza di fruizione di spazi utili all'attività fisica o relax: oltre ai requisiti obbligatori, già analizzati in preceden-

za, diversi parametri opzionali valutano la presenza di spazi ricreativi dedicati, fissando un minimo di 7 m² per occupante regolare e ulteriori aree per lo sport, aree ludiche, nonché aree verdi e design di interni ed esterni che integrino la natura nell'abitazione.

WELL si può definire una fondata sull'esigenze dell'utente e al tempo stesso in grado di controllare se l'utente è integrato e diviene parte attiva nel controllo dello spazio. Tuttavia,

l'user perception che raccoglie le opinioni su quasi la totalità degli aspetti sopradescritti, in termini di peso sull'intera valutazione è prevista solo per circa il 10%, influenzando poco sul punteggio complessivo. Di seguito si riporta la Tabella n. 2 con la selezione degli indicatori opzionali utili a classificare la qualità di un ambiente di vita e a valutare la misura e la forma di coinvolgimento degli utenti nella gestione dello spazio abitativo.

Tabella 2 Optimization parameters that imply an active users' involvement of WELL V2 pilot Q1.

Env. Cat.	WELL issue	Assessment criteria	Weight	PB or UP*
Air	A08 Air Quality Monitoring and Awareness	Monitor indoor air quality issues as well as inform and educate individuals through educational training and a digital or physical library that includes the impact of indoor air quality on human health.	2%	BP/UP
Water	W05 Water Quality Consistency	Testing of water quality parameters; the results are made available to occupants through visual displays prominently located near sources of drinking water and on a website accessible to occupants.	2%	BP/UP
	W09 β Onsite Non-Potable Water Reuse	Projects provide visual evidence of signage to occupants to help them to distinguish potable from non-potable water as well as informative displays to highlight the safety features and conservation goals of the non-potable water system.	1%	BP
Nourishment	N07 Nutrition Education	Individual nutrition consultations by certified nutrition professionals on a quarterly basis, at minimum. Educational materials that promote healthy eating and nutrition.	1%	BP
	N12 Food Production	Training or educational opportunities are made available to regular occupants (e.g., gardening workshops, plant harvesting guidelines). Projects provide planting supplies, watering system and gardening tools.	1%	BP
Light	L04 Glare Control	The shading is controllable by the occupants. All shades can be raised either manual or automatically.	3%	BP

	L08 Occupant Control of Lighting Environments	Light systems are tuneable and automated to meet the circadian and visual requirements of the occupants. Regular occupants have control of light levels, colour temperature and colour of electric light in their immediate environment.	3%	BP
Movement	V06 Physical Activity Opportunities	Age- and ability-appropriate physical activity/exercise opportunities, led by a qualified professional, are offered, either in-person or virtually at no cost.	2%	BP
	V08 Physical Activity Spaces and Equipment	There is a dedicated physical activity space (green space, recreational field or court, fitness centre, play space geared toward children) per dwelling unit.	2%	BP
	V09 Exterior Active Design	Projects provide an outdoor plaza or similar open-air space or a walking path or trail that can be used year-round and contains seating, provides access to daylight.	1%	BP
Thermal Comfort	T02 Enhanced Thermal Performance	A post-occupancy survey is administered at least twice a year. The survey includes an assessment of overall satisfaction with thermal performance and identification of thermal comfort-related issues.	3%	UP
	T03 Thermal Zoning	All regular occupants have control over temperature through either thermostat present within the thermal zone or digital interface available on pc or smart-phone.	2%	BP
	T06 Thermal Comfort Monitoring	Real-time display of dry-bulb temperature and relative humidity is made available to occupants through one monitor screen or website or phone application.	1%	BP
Materials	X14 Material Transparency	A digital or physical library is provided to occupants on compliant products as part of the resource library required. The library is prominently displayed and easily accessible to occupants.	1%	BP
Sound	X15 Contact Reduction	Project establishes and communicates rules and expectations for the usage and cleaning of shared tools and devices for all regular occupants.	2%	BP
Mind	M07 Restorative Spaces	There is a designated indoor or outdoor space within the project boundary that is exclusively for contemplation, relaxation and restoration and is a minimum of 7 m ² per regular occupant.	2%	BP
	M09 Enhanced Access to Nature	There is an access to nature by further incorporating nature through interior and exterior design, nature views and access to nearby nature.	1%	BP

Mind Community	C04 Enhanced Occupant Survey	Annually are conduct stakeholder interviews, focus groups and/or observation to discuss building features and wellness initiatives and their impacts on occupant health and well-being.	3%	UP
	C07 Community Immunity	Provides regular occupants information on how the project facilitates vaccine availability. Encourages regular occupants to receive the vaccine. Educates regular occupants to receive the vaccine.	2%	BP
	C11 Civic Engagement	All residents receive reminders to vote in local and national elections, including instructions on how to determine voting station.	1%	BP
	C13 Accessibility and Universal Design	The spaces are optimized with universal design requirements to meet occupant needs related to safety, developmental and intellectual health, wayfinding, inclusion, technology.	3%	BP
	C15 Emergency Preparedness	An emergency management plan is in place in the case of emergency situations within the building or surrounding community and educational resources are made available to all regular occupants.	3%	BP
	C16 Community Access and Engagement	There is a shared, flexible public space for use by the surrounding community, and to offer programming that engages local individuals in managing or utilizing the space in diverse ways.	1%	BP
	C17 Housing Equity	Are designated affordable housing units and are reduced housing costs for low-income tenants.	3%	BP
	C18 Emergency Resilience and Recovery	Projects are implemented with a outdoor or indoor space made available to emergency responders and a shelter-in-place plan for emergencies in case occupants cannot leave the building. Projects located in a region with heightened risk of infectious respiratory disease transmission require proof of vaccination and face masks worn indoors.	3%	BP

*Building Performance (BP) or User Perception (UP)

2.2 La IEQ certificata da LEED v4.1 O+M

Lo statunitense LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) è il protocollo maggiormente utilizzato nel mondo [25]. L'USGBC (US Green Building Council) ha sviluppato differenti versioni in funzione della destinazione d'uso degli edifici e per ciascuna, nella va-

lutazione dei parametri fa riferimento alle norme tecniche americane ASHRAE e europee EN e ISO [26]. La certificazione considera l'intero ciclo di vita dell'edificio, mirando a garantire il raggiungimento di alte prestazioni in aree chiave della sostenibilità ambientale ed umana (risparmio delle risorse, accessibilità del sito, efficienza energetica, innovazione nella proget-

tazione, qualità dei materiali e IEQ). LEED utilizza una struttura basata su crediti, alcuni obbligatori (required), che possono essere assegnati per ciascuna categoria e la cui somma determina il raggiungimento di un determinato livello (certified 40-49, Silver 50-59, Gold 60-79, Platinum \geq 80 punti) [27].

Il protocollo LEED v4.1 è particolarmente incentrato sull'IEQ e presenta crediti relativi all'accessibilità, al consumo delle risorse (acqua, energia e materiali), al servizio rifiuti, alla qualità dell'aria interna. La versione LEED v4.1 O+M è specifica per gli edifici esistenti che sono pienamente operativi e occupati da almeno un anno. Il documento è diviso in due sezioni: "Existing Buildings Scorecard" e "Interiors Scorecard"; la prima analizza interamente gli edifici esistenti, considerando anche le aree esterne di pertinenza, la seconda è focalizzata sull'ambiente interno. In tale studio è esaminata la sezione inerente allo spazio interno. La valutazione della IEQ avviene per maggior parte degli indicatori, invitando il professionista certificatore a svolgere un audit obiettivo che verifichi la sussistenza di misure atte a migliorare le condizioni dello spazio interno. Tali misure interessano talvolta le performance dell'edificio, altre volte la politica di gestione. Il risparmio delle risorse è un tema ricorrente nella valutazione, sono stimati: i consumi d'acqua (14%), di energia, le emissioni gas (33%) annuali ed è osservato se sono poste in atto, per tali risorse, misure di controllo e razionalizzazione. La valutazione prevede, inoltre, la rassegna di tutti gli acquisti annuali di materiali di consumo e da costruzione, per verificare se sono riciclati, ricaricabili, a base biolo-

gica e se dispongono di certificazioni ambientali di prodotto (4 %).

Ampia attenzione è posta sulle politiche di gestione dei servizi, inerenti: i rifiuti (8%), con la specifica nota di disporre di luoghi di stoccaggio per i materiali riciclabili e con la verifica che il peso in kg della materia condotta alle discariche o impianti di incenerimento per un anno intero, sia sotto determinate soglie; l'acquisto di materiali e prodotti per la manutenzione dell'edificio, ecologici e da razionalizzare (prerequisito); le operazioni di manutenzione e ristrutturazione da attuare mediante un piano strutturato (prerequisito); la pulizia ordinaria con procedure controllate e prodotti non nocivi e straordinaria da effettuare secondo uno specifico piano di gestione (es. disinfestazione di organismi animali nocivi) (prerequisito).

La qualità dell'aria è l'indicatore più rilevante nell'intera procedura di valutazione, è analizzata sotto diversi aspetti: dal calcolo delle eventuali emissioni degli apparecchi refrigeranti; alla verifica del sistema di ventilazione naturale o meccanica in atto; alla misurazione dei VOC e dei flussi d'aria in entrata ed in uscita (prerequisito); all'attivazione del divieto di fumo (prerequisito); al controllo di sostanze nocive presenti nei prodotti previsti per la manutenzione ed in eventuali pesticidi in uso (1%). La filosofia posta alla base della certificazione LEED è simile a quella di WELL, con la quale si allinea per diversi aspetti e gli standard stessi sono progettati per operare insieme, attraverso una collaborazione di lunga data finalizzata a indirizzare il costruito verso una dimensione più

rispettosa sia della salute umana che dell'ambiente.

Le prestazioni minime di qualità dell'aria interna previste in LEED si eguagliano alla garanzia di adeguata ventilazione, all'implementazione di sistemi di filtraggio di particelle inquinanti e al divieto di fumo nelle aree comuni indicato nella certificazione WEEEL.

La scelta, nella versione V4 rispetto alla V2 del protocollo LEED [28], di rimozione di alcuni crediti in favore di uno snellimento della procedura di certificazione, pone LEED in svantaggio rispetto WEEEL negli ambiti del comfort termico e visivo, per i quali WEEEL prescrive molteplici misurazioni in situ (es. simulazione luce diurna migliorata, controllo degli occupanti dei livelli di luce per tutti gli spazi, controllo e monitoraggio dei parametri termici). Per alcuni punti, quali ad esempio quelli inerenti alla gestione di pulizia ecologica, WEEEL richiede requisiti specifici sulla formazione del programma, sul protocollo di pulizia e sullo stoccaggio dei prodotti, rispetto a LEED che accetta un qualsiasi piano di lavoro basta

che sia in essere. WEEEL di base valuta le opinioni degli utenti e prevede il loro coinvolgimento in tutti i parametri; i sondaggi agli utenti in LEED sono in percentuale minore e hanno diverse categorie di domande rispetto a quelli previsti in WEEEL. In particolare, in LEED v4.1 O+M l'user perception, rilevata mediante interviste, si riscontra soltanto per definire la produzione dei rifiuti, lo stato dell'accessibilità legata al servizio di mobilità (14 %) e concorre al 50%, insieme alle misurazioni di TVOC e CO2, per la definizione della qualità dell'aria indoor. Peraltro, in LEED è preponderante la misura delle prestazioni dei sistemi tecnologici (68 %) e delle politiche di gestione dei servizi nell'immobile (32 %), mediante parametri che indirizzando la valutazione più verso una dimensione della sostenibilità più ambientale che sociale o economica.

Di seguito si riporta la Tabella n. 3 con la selezione degli indicatori obbligatori e opzionali, con il relativo peso sulla valutazione complessiva, utili a classificare la qualità di un ambiente di vita secondo LEED v4.1 O+M.

Tabella 3 Precondition and optimization parameters of LEED v4.1 O+M Interiors Scorecard.

Env. Cat.	LEED issue	AIM	Assessment criteria	Weight	PB/ UP*
Location and Transp. (14%)	LT Transport. Performance	To reduce pollution and land development effects from transportation.	Regular occupants must be surveyed and shall provide information on their two-way commutes over one work week. The survey must be conduct at least once per year.	14%	UP

Water (15%)	WE Water Performance	To support water management and reduce water consumption.	Have permanently installed water meters that measure the total potable water use. Measure total potable water use on a monthly basis for twelve consecutive months.	15%	BP
Energy and Atmosphere (34%)	EA.1 Energy Efficiency Best Management Practices	To promote continuity of information to ensure that energy-efficient operating strategies are maintained.	Conduct an energy audit that verify if the operations and maintenance plan meet the requirements of the ASHRAE preliminary energy use analysis or EN 16247:2014 [29].	Required	BP
	EA.2 Fundamental Refrigerant Management	To reduce stratospheric ozone depletion.	Confirmation that no CFC-based refrigerants are included in any new mechanical cooling and that comprehensive phase-out plan for CFC-based refrigerants is in place. Confirmation that refrigerant leakage rate has been met.	Required	BP
	EA.3 Energy Performance	To support energy management and reduce environmental and economic harms associated with excessive energy use.	Have permanently installed energy meters or submeters that measure total building energy consumption. Measure greenhouse gas emissions and source energy for twelve consecutive months.	33%	BP
	EA.4 Enhanced Refrigerant Management	To reduce ozone depletion and minimizing direct contributions to climate change.	Verify if there is no refrigerants or low-impact refrigerants. Select refrigerants that are used in heating, ventilating, air-conditioning, and refrigeration equipment and calculation the Impact.	1%	BP
Materials and Resources (12%)	MR.1 Purchasing Policy	To reduce the environmental harm from materials and products purchased.	Have in place an environmentally preferable purchasing (EPP) policy for materials and products purchased for the project during regular operations.	Required	BP
	MR.2 Facility Maintenance and Renov. Policy	To reduce the environmental harms associated with the materials purchased, installed, and disposed.	Have in place a facility maintenance and renovation policy to be implemented at the discretion of building owners, operators, or tenants.	Required	BP
	MR.3 Waste Performance	To track and reduce the waste that is generated by building occupants.	Have in place storage locations for recyclable materials. Measure the total weight of waste that is generated, and the total weight that is diverted from landfills and incineration facilities for full year.	8%	BP/ UP
	MR.4 Purchasing	To reduce environmental harm from materials and products purchased, used and disposed.	Track all ongoing consumable and building materials purchases, to verify if they are recycled, rechargeable, Bio-based, and if they have any certifications such as EPD.	4%	BP

Indoor Environmental Quality (24%)	EQ.1 Minimum Indoor Air Quality	To contribute to the comfort and well-being of building occupants.	Ventilate the project spaces mechanically or naturally. Measure the quantity of outdoor air delivered and exhaust ventilation rates.	Required	BP
	EQ.2 Environmental Tobacco Smoke Control	To prevent exposure of building occupants to environmental tobacco smoke.	Activate no-smoking policy, prohibit smoking in the building or compartmentalization of smoking areas.	Required	BP
	EQ.3 Green Cleaning Policy	To reduce levels of chemical, biological, and particulate contaminants.	Have in place a green cleaning policy or a Certified Cleaning Service for the green cleaning procedures, materials, and services that are within the project and site management's control.	Required	BP
	EQ.4 Indoor Environmental Quality Performance	To assess how well the building is performing regards to indoor air quality and comfort.	Conduct an occupant satisfaction survey and/or an indoor air quality evaluation. Take the indoor air measurements in locations representative.	20%	UP/ BP
	EQ.5 Green Cleaning	To reduce levels of chemical, biological, and particulate, by implementing effective cleaning procedures.	Perform routine inspection and monitoring of the facility's green cleaning policy to verify that the specified strategies are being used and to identify areas in need of improvement.	3%	BP
	EQ.6 Integrated Pest Management	To minimize pest problems and exposure to pesticides.	Have In-house an integrated pest management (IPM) plan or a Certified IPM service for the building and grounds within the project boundary.	1%	BP
Innovation (1%)	IN Innovation	To encourage projects to achieve exceptional or innovative performance.	One principal participant of the project team must be a LEED AP. Achieve significant environmental performance using a strategy not addressed in the rating system.	1%	BP

*Building Performance (BP) or User Perception (UP)

2.3 La IEQ certificata da BREEAM In-Use v6

BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), certificazione anglosassone, è il primo schema al mondo finalizzato alla valutazione degli impatti

degli edifici sulla sfera ambientale e sociale, divenendo un modello per successive certificazioni. BREEAM In-Use International Residential [30] descrive uno standard di prestazione rispetto al quale è possibile valutare gli edifici residenziali esistenti; quindi, gli ambienti di vita; la versione V6 è l'ultima pubblicata e risale a

maggio 20 BREEAM assegna punti premiali mediante un sistema di rating in otto categorie: salute e benessere, energia, trasporti, acqua, risorse, resilienza, uso del suolo ed ecologia, inquinamento [31]. Per ogni buona pratica sono previsti uno o più crediti a seconda di quanto un'azione in una determinata categoria sia ritenuta più rilevante al conseguimento dell'obiettivo di sostenibilità dell'edificio. I requisiti e di conseguenza le categorie hanno, quindi, un peso differente nella valutazione. Dalla somma dei punteggi di tutte le categorie si ottiene il totale, che viene tradotto nel rating finale: Acceptable > 10%, Pass > 25%, Good > 40%, Very Good > 55%, Excellent > 70% o Outstanding > 85%, se un edificio ottiene un punteggio inferiore al 10%, non è classificabile [32]. La certificazione è suddivisa in due parti: la prima "Asset Performance" che analizza le caratteristiche prestazionali intrinseche dell'edificio e la seconda "Building Management" che esamina la qualità della gestione e il funzionamento dell'immobile. Per conformità ai sistemi di valutazione precedentemente descritti ci si limita allo studio relativo alle prestazioni dell'edificio.

Il maggior numero di aspetti di natura sociale è posto nell'ambito delle categorie salute e benessere (con un'incidenza pari al 17 % sulla valutazione complessiva).

Il comfort visivo è valutato misurando l'area vetrata (HEA 01), i sistemi di ombreggiamento (HEA 02), i livelli di illuminazione all'interno e all'esterno (HEA 03), la qualità dell'illuminazione artificiale (HEA 05), la panoramicità (HEA 06). In riferimento al comfort termico si verifica la possibilità di controllo da parte dell'uten-

te dei livelli di temperatura e umidità (HEA 07). La qualità dell'aria è accertata se nell'abitazione o nel complesso abitativo vi sono sensori di rilevazione di CO e di CO₂ (HEA 09-10), se vi è un sistema di ventilazione conforme agli standard UE e ANSI/ASHRAE (HEA 08), effettuando il test standard ISO 11665 [33] per la presenza del gas radon (HEA 13) ed inoltre se eventuali sostanze chimiche sono immagazzinate (POL 02), se i sistemi di raffrescamento e riscaldamento sono conformi alle normative riguardo le emissioni VOC (POL 03) e se sono presenti sistemi di rilevamento di gas nocivi (POL 05). Nella prima parte del documento non vi è attenzione al comfort acustico poiché valutato nell'ambito della gestione dell'edificio. Altri indicatori che afferiscono alla salute e comfort dell'utente sono la presenza di spazi ricreativi (HEA 11) e la presenza negli spazi abitativi di criteri che ne consentono un uso inclusivo (accessibilità orizzontale e verticale, presenza di tecnologie assistive e wayfinding, ecc.) (HEA 12). Una riflessione è riservata alla mobilità sostenibile i cui vantaggi si riversano oltre che sull'ambiente, sull'utente, il quale mediante specifici accorgimenti (prossimità a punti di snodo del servizio pubblico, percorsi ciclabili e pedonali dedicati, punti di ricarica per veicoli elettrici), con facilità, salubrità e sicurezza è servito da trasporto pubblico e/o usa i mezzi propri elettrici (TRA 01-04).

La sostenibilità economica, che inevitabilmente incide sulla psiche dell'utente, è esaminata valutando la sussistenza di azioni preventive al consumo di risorse quali: manutenzione programmata (al fine di evitare lavori costosi inattesi), riciclo e riutilizzo di rifiuti e inventa-

rio delle risorse dell'edificio (RSC 01-03). Il documento, inoltre, indirizza una buona percentuale degli indicatori (14,5 %) sull'incolumità dell'utente, attraverso la valutazione del rischio di alluvione e di allagamento (RSL 01-02), del rischio di danno per calamità naturali (RSL 03), della durabilità e resilienza dell'edificio (RSL 04) e l'eventuale presenza di un sistema di allarme e sicurezza (RSL 05). La categoria "uso del territorio", con la stima della percentuale di aria piantumata, apparentemente legata alla dimensione ambientale si rivela influente per il benessere dell'utente, incidendo su più fattori quali qualità dell'aria, ombreggiatura, comfort termico, psiche (LUE 01). Volendo affrontare la dimensione sociale, alcuni indicatori tra le categorie annoverate non sono citati poiché inerenti prettamente alla sfera ambientale; così come, si ricorda che, il documento riserva una cospicua sezione alla valutazione delle prestazioni energetiche dell'edificio (ENE 28,5 %) e all'uso sostenibile dell'acqua (WAT 9 %). Si può, dunque, riassumere un peso pari al 40 % (ENE+WAT+POL02) relativo esclusivamente alla dimensione ambientale, un peso pari al 32,5 % di indicatori relativi sia alla dimensione ambientale che sociale (HEA09-10+HEA13+TRA01+LUE+POL01+RSL01-03) e pari al 27,5 % riferito solo alla dimensione sociale. Si rileva che il coinvolgimento degli attori è pressoché assente: analizzando il metodo di valutazione di ciascun indicatore si può osservare che la percezione dell'utente è considerata in misura inferiore al 5 % rispetto al totale processo valutativo (si veda Table 4). Confrontando il metodo BREEAM con

il WELL ci si rende conto dei presupposti relativi alla minore attenzione che il protocollo anglosassone pone rispetto alla dimensione sociale. In diverse occasioni WELL richiede oltre una verifica strumentale, una verifica delle prestazioni in loco di terze parti. WELL fa, in più occasioni, riferimento al binomio uomo-natura, espresso attraverso l'uso di materiali naturali, motivi, forme, colori o suoni all'interno del contesto abitativo e richiamando la natura come ausilio al comfort termico e visivo sia all'interno che all'esterno.

Il controllo dei parametri da parte dell'utente è un elemento essenziale per entrambi i protocolli, WELL in aggiunta sostiene il "controllo condiviso" tra più occupanti. Tra le attività prossime al contesto abitativo WELL raccomanda servizi aggiuntivi quali, ad esempio, spazi ricreativi comuni (orti e cucine comuni, aree verdi e per l'attività fisica), definendo più specifiche sui servizi con requisiti di prossimità più severi (es. aree comuni che soddisfino una certa dimensione in rapporto allo spazio abitativo; numero minimo di postazioni per la mobilità sostenibile o distanza minima per quella di pubblica utilità). WELL include anche un inventario annuale delle risorse per una facile risposta alla manutenzione e alle emergenze, nonché esercitazioni pratiche e comunicazioni dell'utenza frequenti con tecnici esperti. Di seguito si riporta la Tabella n. 4 con la selezione degli indicatori obbligatori e opzionali, con il relativo peso sulla valutazione complessiva, utili a classificare la qualità di un ambiente di vita secondo BREEAM In-Use.

Tabella 4 Precondition and optimization parameters of BREEAM In-Use Asset Performance.

Env. Cat.	BREEAM issue	AIM	Assessment criteria	Weight	PB/ UP*
Health and Wellbeing (17%)	Hea 01 Daylighting	To ensure residents have access to good levels of daylight.	For each relevant room, compare the glazed area to room area percentage to the minimum performance requirements for the asset's latitude.	5,7%	BP
	Hea 02 Avoiding overheating from solar gain	To recognise and encourage external shading features.	Photographic evidence of external shading features on all windows where there is a risk of overheating.	5,7%	BP
	Hea 03 Internal and external lighting levels	To ensure appropriate lighting to residents.	Measuring in lux the light falling on a surface using calibrated illuminance meters with a photocell that is both colour/spectrally and cosine corrected.	11,4%	UP
	Hea 05 Minimize flicker from lighting systems	To minimise the impact of flicker on asset users.	Visual and technical specifications inspection that the installed lighting meets the criteria.	5,7%	UP
	Hea 06 View out	To evaluate the quality of the external view.	Visual inspection if rooms have an adequate view out (8 m distant from the surrounding wall, etc.) and a view of a natural outdoor environment.	11,4%	UP
	Hea 07 User comfort control, and maintenance	To recognise the ventilation systems that are easy to control.	Verify if the ventilation system has a manual or automatic controls tools of ventilation rate and temperature level and if has humidity sensors.	8,6%	BP
	Hea 08 Ventilation system air intakes and exhausts	To ensure that the asset's ventilation system minimises the entry of external sources of air pollution.	Verify if the location of the asset's air intakes and exhausts are in accordance with either of EU and ANSI/ASHRAE standards or is at least 10m horizontal distance from sources of pollution of other buildings.	5,7%	BP
	Hea 09 Carbon dioxide sensors	To monitor of internal conditions to ensure a healthy indoor environment is provided.	Verify if there are sensors that monitor the levels of carbon dioxide in indoor air and if they are linked to the ventilation system and alert the residents when carbon dioxide levels exceed the recommended set point.	5,7%	BP
	Hea 10 Carbon monoxide detection	To protect users from harmful levels of carbon monoxide.	Verify if there are carbon monoxide detection installed that contain combustion appliances.	5,7%	BP

	Hea 11 Indoor and/or outdoor space	To recognise the provision of outdoor recreational space, promoting community activity.	Verify if there are recreational indoor and outdoor spaces provided for residents and if it is at least 25 m2 and if private terraces are minimum 4m2 per apartment.	17,1%	BP
	Hea 12 Inclusive design	To recognise and encourage assets that are inclusive for all residents.	The asset must contain at least 50% accessibility features. The indicators regard: access, horizontal and vertical circulation, sanitary accommodation, orientation, wayfinding, assistive technologies, inclusive spaces.	11,4%	BP
	Hea 13 Radon risk management	To understand the exposure risk radon.	Do the radon test according to the ISO 11665 series of standards.	5,7%	BP
Transport (7%)	Tra 01 Alternative modes of transport	To verify the sustainable transport measures proximity to the site.	Verify the number of compliant electric charging points and the number of compliant cycle storage facilities.	39,1%	BP
	Tra 02 Proximity to public transport	To ensure public transport available to building occupants.	Measuring the distance of public transport node via safe pedestrian routes and not in a straight line.	34,8 %	BP
	Tra 03 Proximity to amenities	To ensure building users have access to local amenities.	Measuring the distance of amenities via safe pedestrian routes and not in a straight line.	17,4 %	BP
	Tra 04 Cyclist safety	To encourage safe access around the site and outdoor space.	Verify if there are safe pedestrian routes from the cycle storage to the entrance of the home.	8,7 %	BP
Resources (10,5%)	Rsc 01 Condition survey	To encourage plan maintenance.	Verify if a condition survey been completed within the last 5 years and if has been rectify any defects.	38,8 %	BP
	Rsc 02 Reuse and recycling facilities	To facilitate the reuse and recycling of waste from the asset.	Verify if there are suitable facilities available for storing waste from the asset near or within the building and suitable neighbourhood recycling.	38,8 %	BP
	Rsc 03 Resources inventory	To enable asset owners from the value of resources.	Verify if a resources inventory within a building information model been completed in the last 5 years.	22,4 %	BP
Resilience (14,5 %)	Rsl 01 Flood risk assessment	To encourage the identification of flood risk and implement mitigation measures.	Verify if a flood risk assessment (FRA) has been carried out by a relevant authority and which is flood risk level was assigned to the asset.	26,3 %	BP
	Rsl 02 Surface water run-off impact mitigation	To avoid discharge of rainfall to public sewers, minimising flooding on-site.	Verify measures to minimise the rate of surface water runoff (Drainage; Permeable surfaces; Infiltration trenches; Green or Blue roofs; etc.)	10,5 %	BP

	Rsl 03 Natural hazard risk assessment	To identify risks of natural hazards and recover capacity.	Verify if a risk assessment been carried out to current natural hazards by a relevant authority.	21,1%	BP
	Rsl 04 Durable and resilient features	To protect exposed elements of the building from pedestrian traffic and external vehicular collision.	Verify if there are suitable protection measures (hard-wearing and easily washable floor finishes; bollards, barriers or raised kerbs; robust external wall construction, up to 2m high).	21,1%	BP
	Rsl 05 Alarm systems	To ensure the alarm systems to prevent damage to property within the asset.	Verify if the asset been fitted with fire and intruder alarm systems that are certified to a National or International standard.	21,1%	BP
Land use (4 %)	Lue 01 Planted area	To encourage planted areas within the asset's footprint.	To calculate the green area footprint and what percentage has been planted (green walls include).	57,1	BP
Pollution (9 %)	Pol 02 Chemical storage	To reduce the impact of a chemical leak by minimising impact of the building.	Verify if all hazardous chemicals are stored in areas with containment to deal with $\geq 110\%$ of the chemicals stored.	12,5	BP
	Pol 03 Local air quality	To reduce local air pollution by using no or low emission heating and hot water systems in the asset.	Comparing the emissions of nitrogen oxides, particulate matter or volatile organic compounds of the asset's heating and hot water systems with the limit values (mg/kWh).	25	BP
	Pol 05 Refrigerant leak detection systems	To reduce level of greenhouse gas by the refrigerants leakage.	Verify if there is an automated refrigerant leak detection system in place for all equipment.	25	BP

*Building Performance (BP) or User Perception (UP)

2.4 I criteri di Baukultur vs gli strumenti di valutazione

Sebbene la letteratura restituisca un ampio consenso sull'influenza che la qualità degli ambienti di vita può generare sul benessere delle persone [34, 35, 36, 37, 38, 39], può essere comunque complesso per le amministrazioni o i professionisti valutare e garantire edifici salubri e confortevoli. Gli standard di certificazione degli edifici aiutano i progettisti a considerare più

aspetti convergenti verso la sostenibilità e ad indirizzare gli interventi verso soluzioni tecnologiche che ne incrementino il comfort abitativo. Le certificazioni, inoltre, influenzano le scelte del mercato immobiliare, sono garanzia di soluzioni progettuali e di corretta gestione; convenzionalmente per la collettività dichiarano la qualità di un edificio [40].

Concentrandosi sul concetto di qualità della costruzione e in riferimento ai principi presentati nell'ultima conferenza del Consiglio

degli Architetti d'Europa (ACE) [41] ed espressi nella Dichiarazione di Innsbruck del 4 maggio 2019 [42], si procede alla verifica dell'allineamento dei protocolli analizzati. L'intento della Dichiarazione è quello di proporre riflessioni sul concetto di qualità nell'ambiente costruito e fare luce sulle buone pratiche per la sua valutazione, premettendo che tale questione non è una verità assoluta ma dipende dal contesto e dalla percezione di chi guarda. Il Documento elenca alcune caratteristiche essenziali (criteri) di un luogo che possono essere identificate come driver di qualità, portando benefici per gli individui e la società.

Si è verificata la correlazione tra le "caratteristiche essenziali" [43] e i protocolli esaminati, mettendo in luce la corrispondenza dei criteri elencati nella Dichiarazione e la loro presenza nel processo valutativo. Ove l'esito sia positivo si esplicitano gli indicatori che per obiettivo di valutazione afferiscono allo stesso ambito tematico della caratteristica essenziale.

I protocolli di certificazione di sostenibilità negli edifici più diffusi a livello internazionale e qui esaminati, sono WELL, LEED e BREEAM, i cui criteri di valutazione analizzano la progettazione, la costruzione e la gestione sotto i punti di vista ambientale, economico, sociale – wellbeing, in maniera e in peso differente. BREEAM e LEED sono metodologie di valutazione della sostenibilità ambientale, WELL di quella sociale. WELL e BREEAM rispetto a LEED valutano le pratiche sostenibili anche attraverso i successivi processi di gestione e manutenzione dell'edificio e a tal fine BREEAM dedica uno specifico documento alla fase di esercizio. Al di là

delle differenze individuali dei tre standard esaminati, per lo più sui sistemi di rating, tutti e tre si basano su dati hard, valutando in maniera preponderante le prestazioni dell'edificio. Il costante rimando alle norme internazionali, indirizza il valutatore a raccogliere parametri prestazionali misurabili e confrontabili con quelli vigenti. Questi interessano aspetti soprattutto di natura ambientale (consumo di energia e risorse), riservando al valutatore un'attenzione bassa alla dimensione sociale della sostenibilità e molto limitata al confronto con l'utenza.

Anche se apparentemente le certificazioni si allineano ai criteri ACE in quanto, a parte per l'estetica del luogo, è presente per certificazione almeno un indicatore che tenga conto di tali criteri, calcolando le percentuali in peso rispetto alle valutazioni complessive si può osservare come la maggior parte degli indicatori si concentra in Habitability (40% WELL; 33,5% LEED e 26,7% BREEAM) (si veda Fig. 1 (a) and (b)) e in dell'Environment friendly (4% WELL; 52% LEED e 50,2% BREEAM). Gli ambienti costruiti di alta qualità suscitano interesse e si configurano attrattori di investitori; recenti ricerche attestano l'apprezzamento degli stakeholder agli immobili certificati. Si riconosce a LEED, ad esempio la capacità di un incremento del valore immobiliare tra il 7 e l'11% in funzione al giudizio finale e l'effetto della certificazione non si limita alla valorizzazione dei beni, ma incide anche sui tempi della loro commercializzazione [44].

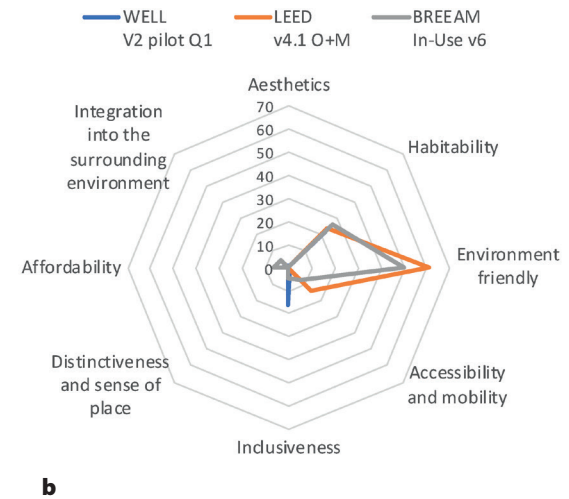
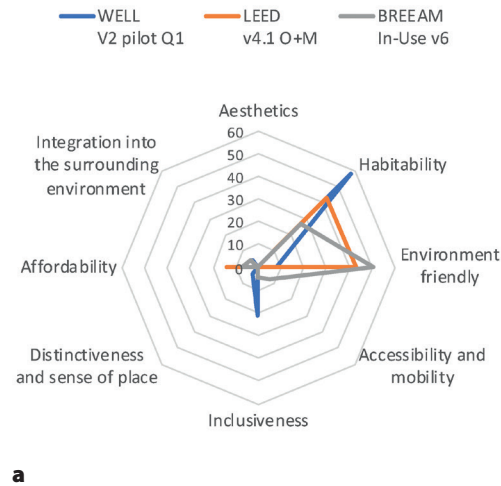
Gli indicatori di valutazione degli standard di certificazione sono riconducibili a quasi tutte le caratteristiche essenziali, ma con un'inci-

denza molto differente (si veda la Tabella n. 5 dove è individuata la corrispondenza di tutti gli indicatori per ciascuna certificazione all'ambito inerente alla caratteristica essenziale).

La correlazione tra gli indicatori e gli ambiti delle caratteristiche è congrua alle inclinazioni di ciascuna certificazione verso una specifica dimensione della sostenibilità: BREEAM e LEED hanno l'obiettivo primario di verificare se l'edificio è progettato per essere efficiente, a basse emissioni inquinanti e resistente ai cambiamenti climatici durante tutto il suo ciclo di vita; WELL valuta in peso maggiore se l'edificio ha caratteristiche tecniche che lo rendono sicuro, salubre e confortevole. L'analisi sul peso degli indicatori mostra una disomogeneità tra le certificazioni e le caratteristiche essenziali: valori

inferiori al 10% sul punteggio base per il conseguimento della certificazione si riscontrano nell'ambito dell'Accessibility and mobility (0,5% WELL; 7% LEED e 7% BREEAM), di Distinctiveness and sense of place (2% WELL; 0,5% LEED e 0% BREEAM), di Distinctiveness and sense of place (2% WELL; 0,5% LEED e 0% BREEAM), di Affordability (1,5% WELL; 7% LEED e 6,8% BREEAM) di Integration into the surrounding environment (2,5% WELL; 0% LEED e 4,5% BREEAM) (Fig. 2). L'inclusività (18,5% WELL; 0% LEED e 4,8% BREEAM) è uno dei fini che si pone WELL per il raggiungimento dell'obiettivo primario di salute e benessere dell'utente e, l'attenzione per il Design for All, che si ritrova trasversalmente in più criteri del processo valutativo, ne è un esempio. Le percentuali su indicate, sono calcolate in base alla media dei valori dei parame-

Fig. 1 Ambiti d'interesse delle certificazioni rispetto ai criteri individuati nella Dichiarazione di Innsbruck 2019 (a) Confronto dei parametri obbligatori. (b) Confronto dei parametri opzionali.



tri obbligatori e di quelli opzionali. Tali valori inducono a riflettere sul divario tra i teoretici indirizzi europei, sintetizzati nella Dichiarazione di Innsbruck e gli effettivi strumenti di valutazione ad oggi disponibili e ne deriva la necessità di un'armonizzazione anche in considerazione del diffuso uso delle certificazioni e degli interessi economici che tale sistema genera sul mercato immobiliare.

Per essere effettivamente utile, una valutazione deve rispondere efficacemente ai bisogni degli attori e la molteplicità degli attori, che hanno interessi, obiettivi, vincoli e preferenze diversi, richiedono una specifica prospettiva di valutazione, non omologabile [45]. La discussione e la condivisione delle scelte progettuali

con l'utenza, mediante processi iteranti e interdisciplinari, possono generare soluzioni partecipate non standardizzate, più vicine agli interessi dell'utenza e su misura.

Il coinvolgimento dell'utenza, in tali processi valutativi, si potrebbe definire "passivo", ovvero l'utente è sensibilizzato, riceve le informazioni sui parametri ambientali e gli vengono assicurati dei servizi che lo assistono nel quotidiano. La ricezione della sua opinione (user experience) resta però ancora una scelta poco perseguita (negli standard esaminati si stima, sull'intera valutazione: 11% parametri obbligatori WELL, 10% parametri opzionali WELL; 0% parametri obbligatori LEED, 28% parametri opzionali LEED; 10% BREEAM).

Tabella 5 Confronto tra le Caratteristiche essenziali di qualità espresse nella Dichiarazione di Innsbruck 2019 e gli indicatori delle Certificazioni di qualità WELL, LEED e BREEAM.

Criteria	Description	WELL V2 pilot Q1	LEED v4.1 O+M	BREEAM In-Use v6
Aesthetics	The place has an artistic dimension; buildings and cities must be beautiful and exciting.	-	-	-
Habitability	The place has technical characteristics that make it safe, healthy and comfortable. It is well maintained and provides a feeling of safety.	A01; A02; A03; A08; W01; W02; W03; W05; W09; N01; N02; N07; N12; L01; L02; L04; L08; T01; T02; T03; T06; S01; X01; X02; X14; X15; C18	EQ.1; EQ.2; EQ.3; EQ.4; EQ.5; EQ.6	Hea 01; Hea 02; Hea 03; Hea 05; Hea 06; Hea 07; Hea 08; Hea 09; Hea 10; Hea 13; RIs 01; RIs 02; RIs03; RIs 04; RIs 05
Environment friendly	The place is designed to be low-carbon, energy-efficient and resilient to climate change throughout its life-cycle.	A04; X03	WE; EA.1; EA.2; EA.3; EA.4; MR.1; MR.3; MR.4	Rsc 02; Pol 01; Pol 02; Pol 03; Pol 04; Pol 05; Ene 01-18; Wat 01-10

Accessibility and mobility	It is easy to move using public or soft transports (walking, cycling). The distribution of volumes and spaces is straightforward.	V09	LT	Tra 01; Tra 02; Tra 03; Tra 04
Inclusiveness	The place is designed for all: everyone, regardless of age, gender and ethnicity must feel welcome.	V01; V02; V06; V08; M01; M07; C01; C03; C04; C07; C11; C13; C15; C16	-	Hea 11; Hea 12
Distinctiveness and sense of place	The place is specific, fitting the local context, has distinctive characteristics and a sense of place.	C02	IN	-
Affordability	There is a strong compatibility of the programme with the place and the budget of the user.	C17	MR.2	Rsc 01; Rsc 03
Integration into the surrounding environment	The place is integrated into its built, natural and cultural environment in a harmonious and coherent manner.	M02; M09	-	Lue 01; Lue 02

I parametri riguardanti la salute, ad esempio, raramente riguardano aspetti connessi alla percezione dell'utente, che potrebbero rilevarsi utili a evitare patologie quali la Sick Building Syndrome [46]; si riferiscono, invece, per la più alta percentuale, alla misura dei contaminati, all'accertamento delle tecnologie di ventilazione che de-terminano la qualità dell'aria indoor e alla relazione con gli spazi esterni. In riferimento alle azioni di coinvolgimento "passivo" sicuramente WELL è la certificazione che presenta un numero di indicatori più elevato e con uno specifico intento di benessere e salute dell'utente e per tal motivo spesso integra le altre due certificazioni mediante i cosiddetti piani di "crosswalk" che armonizzano la valutazione.

Un'ulteriore riflessione che coinvolge tutti e tre gli standard di certificazione è la limitazione di applicabilità sull'ambiente costruito più diffuso, l'edilizia moderna, costituita da edifici

in cemento armato. Tali edifici si configurano lontani dal concetto di sostenibilità ambientale poiché con prestazioni energetiche assenti [47], privi di una sostenibilità economica [48] implicando una necessaria e continua manutenzione dei materiali costitutivi e posizionati, spesso, in centri urbani densi e congestionati incidendo fortemente sulla sostenibilità sociale [49].

Certamente con un recupero intenzionale, anche tali edifici potrebbero accogliere ambienti di qualità ma richieste obbligatorie troppo stringenti riscontrabili in alcuni dei criteri dei processi valutativi esaminati esclude in partenza la possibilità di valorizzare in futuro tale edilizia nel mercato immobiliare [50]. Può essere inusuale, ad esempio, che un edificio residenziale disponga di un piano specifico per la legionella o in molti casi è difficile che vi siano spazi comuni per le attività sportive, per la coltivazione in loco di prodotti biologici o per il

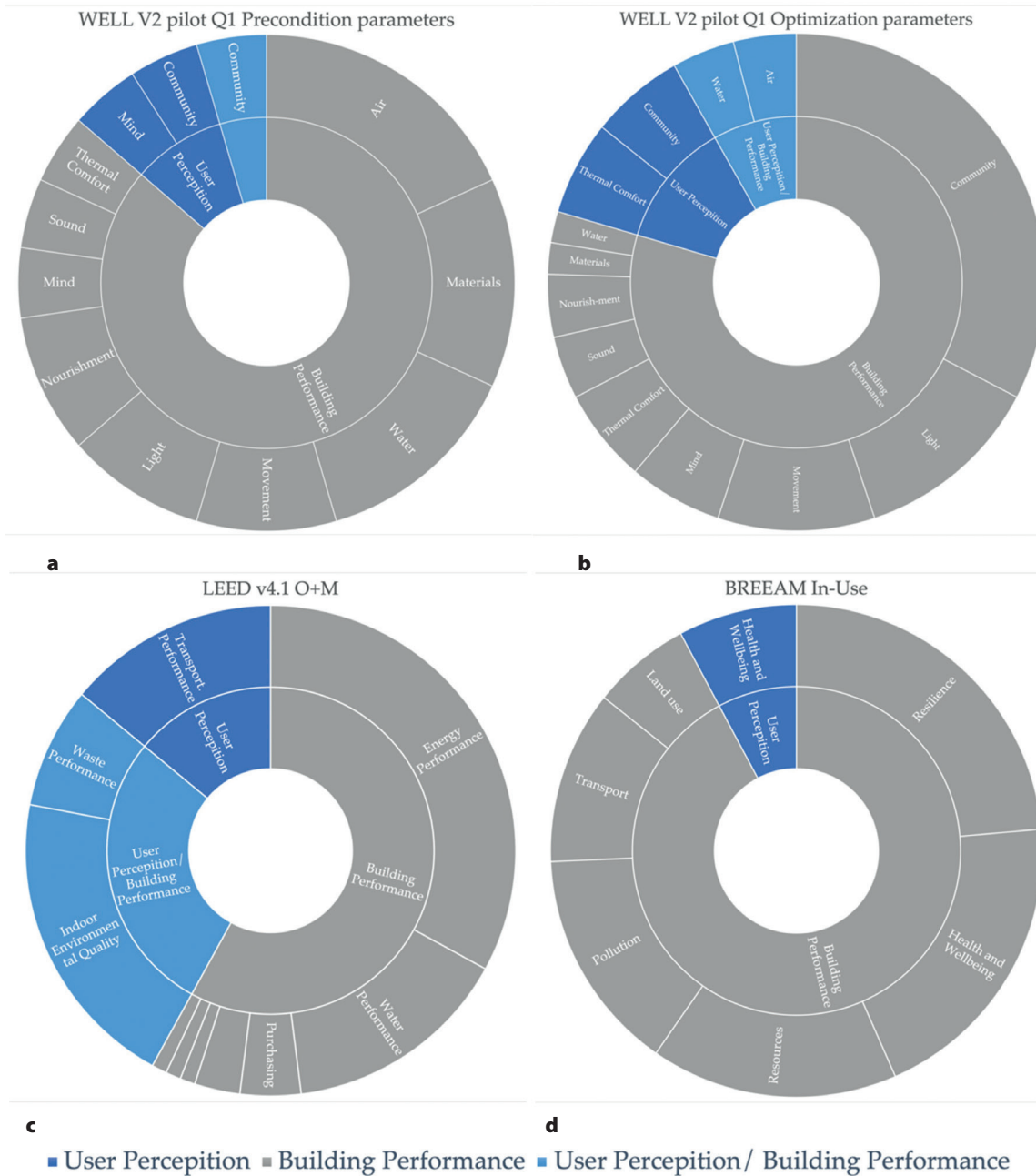


Fig. 2 Weight of “user experience” in the examined standards, in the overall evaluation. (a) Comparison of WELL V2 pilot Q1 precondition parameters. (b) Comparison of WELL V2 pilot Q1 optimization parameters. (c) Comparison of LEED v4.1 O + M optimization parameters. (d) Comparison of BREEAM In-Use parameters.

recupero in loco delle risorse dai rifiuti. Verosimilmente, si potrebbe invogliare la rigenerazione di questo patrimonio, con risultati qualitativi, conformando il livello base delle certificazioni alle potenzialità massime del parco edilizio esistente con soluzioni su misura, indirizzate più alle esigenze degli utenti finali [51] e meno a parametri standardizzati che implicano tecnologie complesse.

Nota

Tale contributo deriva in parte da esiti di ricerca pubblicati in Nicolini E. (2022), *Built Environment and Wellbeing—Standards, Multi-Criteria Evaluation Methods, Certifications*. In Sustainability MDPI, DOI: 10.3390/su14084754.

Bibliografia

1. Acampa, G. Linee guida delle politiche europee: Requisiti qualitativi e criteri di valutazione dell'architettura. *SIEV Valori Valutazioni* **2019**, 23, 47–
2. Reed, R.; Wilkinson, S.; Bilos, A.; Schulte. A comparison of international sustainable building tools. In Proceedings of the 17th Annual Pacific Rim Real Estate Conference, Gold Coast, Australia, 16–19 January **20**
3. Attaianese, E.; Acierno, A. La progettazione ambientale per l'inclusione sociale: Il ruolo dei protocolli di certificazione ambientale. *TECHNE J. Technol. Archit. Environ.* **2017**, 14, 76–
4. International WELL Building Institute. WELL Building Standard: WELL Certification v2™ Pilot. **20** Available online: <https://v2.wellcertified.com/v/en/overview> (accessed on 25 November 2021).
5. Altomonte, S.; Schiavon, S.; Kent, M.G.; Brager, G. Indoor environmental quality and occupant satisfaction in green-certified buildings. *Build. Res. Inf.* **2017**, 47, 255–2
6. Guldager Jensen, K.; Birgisdottir, H. (Eds.) *Guide to Sustainable Building Certifications*; Statens Byggeforskningsinstitut, SBI: Aalborg, Denmark, **2018**; pp. 154–1
7. International WELL Building Institute. People + Planet Applying LEED and The WELL Building Standard. Strategies for Interiors, New Buildings and Existing Buildings Seeking Dual Certification. LEED Crosswalk. **20** Available online: <https://a.storyblok.com/f/52232/x/202a35bb61/leed-crosswalk-wi-th-q4-2020-addenda.pdf> (accessed on 1 December 2021).
8. U.S. Green Building Council. LEED v4.1 Operations and Maintenance. **20** Available online: <https://www.usgbc.org/resources/leed-v41-om-beta-guide>
9. Building Research Establishment. BREEAM In-Use International Technical Manual: Residential V6.0. **20** Available online: https://byggalliansen.no/wp-content/uploads/2020/10/SD243_BREEAM-In-Use-International_Residential-Technical-Manual-V6.pdf
10. International WELL Building Institute, *Crosswalks e Alignments*, <https://standard.wellcertified.com/well-crosswalks>
11. Valente, R., *Sustainable Sites Initiative: criteri aggiornati di valutazione dagli Stati Uniti per progetti di spazi aperti/Sustainable Sites Initiative: US updated rating criteria for open spaces design*. *Techne*, 8, **2014**
12. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 16798:2019 Prestazione energetica degli edifici – Ventilazione per gli edifici*, **2019**
13. *ASHRAE/ANSI Standard 55-2013*; Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers: Atlanta, GA, USA, **20**
14. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 7730:2006 Ergonomia degli ambienti termici – Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale*, **2006**
15. Ente Italiano di Normazione, *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, **2008**
16. *BS EN 12464-1:2011; Light and Lighting. Lighting of Workplaces—Indoor Work Places*. BSI: London, UK, **20**
 17. *8995-1:2002 (CIE S 008/E: 2001); Lighting of Workplaces—Part 1: Indoor*. International Organization for Standardization (ISO): Geneva, Switzerland, **2002**
 18. Brown, T., *Design thinking*. Harvard business review, 86(6), **2008**
 19. Potrč Obrecht, T., Kunič, R., et. Al., *Comparison of health and well-being aspects in building certification schemes*. Sustainability, 11(9), **2019**
 20. Grzegorzewska, M., & Kirschke, P., *The Impact of Certification Systems for Architectural Solutions in Green Office Buildings in the Perspective of Occupant Well-Being*. Buildings, 11(12), 659, **2021**
 21. International WELL Building Institute, *WELL Certification*, <https://v2.wellcertified.com/en/wellv2/overview>
 22. *ANSI/ASHRAE Standard 2-2016; Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings*. American National Standards Institute: New York, NY, USA, **20**
 23. National Standard of the people's Republic of China, *GB 50034-2013 Standard for Lighting Design of Buildings*, **2013**
 24. Story, M. F., *Principles of universal design*. Universal design handbook, **2001**
 25. U.S. Green Building Council, *LEED for Existing Buildings v2.0 Reference Guide*, **2007**
 26. Fantozzi, P., Scatizzi, G., Venturelli, F. *La certificazione LEED: Guida ai principi*. HO-EPLI Editore: **2017**
 27. Speccher, A., Bruni, E., *The Green Energy Audit, a new procedure for the sustainable auditing of existing buildings integrated with the LEED Protocols*. Sustainable Cities and Society 3, **2012**; pp. 54-65
 28. Wu, P., Mao, C., Wang, J., et. Al. *A decade review of the credits obtained by LEED v2.2 certified green building projects*. Building and Environment, 102, **2016**; pp. 167-178
 29. *BS EN 16247-2:2014; Energy Audits—Part 2: Buildings*. BSI: London, UK, **2014**
 30. Summerson S., Atkins J., Harries A. *BREEAM In-Use Driving sustainability through existing buildings*, https://tools.breeam.com/filelibrary/BREEAM%20In%20Use/KN5686--BREEAM-In-Use-White-Paper_dft2.pdf
 31. BRE Group, *BREEAM product*, <https://bregroup.com/products/breeam/>
 32. BRE Global, *The world's foremost environmental assessment method and rating system for buildings*, chrome-extension://efaidnbmn-nnibpcajpcglclefindmkaj/https://tools.breeam.com/filelibrary/BREEAM_Brochure.pdf
 33. *ISO 11665-4:2012; Measurement of Radioactivity in the Environment—Air: Radon-222—Part 4: Integrated Measurement Methods for Determining Average Activity Concentration Using Passive Sampling and Delayed Analysis*. International Organization for

- Standardization (ISO): Geneva, Switzerland, **2012**
34. Babich, F., & Lollini, R. *Caratteristiche dell'involucro e qualità degli ambienti interni*. Casa e Clima, 15, **2020**; pp. 24-
 35. Erlandson T., Cena K, et. Al. *Environmental and human factors influencing thermal comfort of office occupants in hot – humid and hot – arid climates*. Ergonomics 15; 46(6): **2003**; pp. 616-
 36. Azmoon H., Dehghan H., et Al. *The relationship between thermal comfort and light intensity with sleep quality and eye tiredness in shift work nurses*. J Environ Public Health 2013; **2013**
 37. Del Ferraro S., Iavicoli S., et Al. *A field study on thermal comfort in an Italian hospital considering differences in gender and age*. Appl Ergon **2015**; pp. 177-84
 38. Cumo, F., Caruso, G., et. Al., *L'indice di valutazione dell'Indoor Air Quality come indicatore di sicurezza in ambienti lavorativi confinati, con particolare riferimento al terziario avanzato*. In Conferenza VGR 2006 Valutazione e Gestione del Rischio negli Insediamenti Civili e Industriali, **2006**; pp. 17-19
 39. Naydenov, K., Schiavon, S., Zecchin, R., *How much air should be supplied in residential buildings?*, **2009**
 40. Schweber, L., *The effect of BREEAM on clients and construction professionals*. Building Research & Information, 41(2), **2013**; pp: 129-145
 41. European Ministers of Culture. Davos Declaration Towards a High-Quality Baukultur for Europe, Office Fédéral de la Culture Section Patrimoine Culturel et Monuments Historiques. 20 Available online: https://davosdeclaration20ch/media/Brochure_Declaration-de-Davos-2018_WEB_2.pdf (accessed on 1 December 2021).
 42. Architect's Council of Europe (ACE). Statement Presented on 4 May 2019 in Innsbruck (Austria) on the Occasion of the ACE Conference "How to Achieve Quality in the Built Environment: Quality Assurance Tools and Systems". 20 Available online: https://www.ace-cae.eu/fileadmin/New_Upload/_15_EU_Project/Creative_Europe/Conference_Quality_2019/Inn_Stat_EN_FINAL.pdf (accessed on 3 November 2021).
 43. Forte, F., Qualità architettonica e valutazione: una lettura nel quadro europeo. Valori e Valutazioni, (23), **2019**; pp. 37-45
 44. Rebuild Italia. Green Building: Valori e Tendenze. Ricerca Promossa da Rebuild Italia e Condotta in Collaborazione con CBRE ITALIA e GBCI EUROPE. 20 Available online: <https://www.rebuilditalia.it/it/MS/green-building-valori-e-tendenze/> (accessed on 3 November 2021).
 45. Bentivegna, V. Gli aspetti relazionali della qualità dell'opera di architettura. *SIEV Valori Valutazioni* **2019**, 23, 23-
 46. Redlich, C. A., Sparer, J., & Cullen, M. R., *Sick-building syndrome*. The Lancet, 349(9057), **1997**; pp. 1013-1016
 47. Economidou, M., Atanasiu, et. Al., *Europe's buildings under the microscope. A country-by-country review of the energy perfor-*

- mance of buildings EDTEWEB 20* <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/21514343>
48. Rizzi, M., *Consigli di risparmio energetico per gli edifici esistenti*. Provincia di Udine, **2006**
 49. Baglioni, A., Piardi, S., et. Al. *Costruzioni e salute. Criteri, norme e tecniche contro l'inquinamento interno*, **1986**
 50. Battisti, A., & Tucci, F., *Qualità ed ecoefficienza delle trasformazioni urbane. Sperimentazione progettuale di unità insediative a conformità ecologica nell'ambito dello SDO di Roma*, **2002**
 51. Chiesa, G., & Giuliano, D. Ò., *Risparmio energetico in edilizia: criteri e norme*. Masson, **1996**

Capitolo 3

Metodi di valutazione del comfort indoor nel patrimonio costruito

Chapter 3. Indoor comfort assessment methods in the built environment

Valuable indoor environments are the result of the fulfillment of users' needs through building performance, deriving from a synergic and multi-disciplinary design of environmental and technological systems of the building envelope with hydric, electrical, and thermal systems, when present.

A key role is also played by the conservation of the building performances over time, which requires constant overall quality evaluation through period control and monitoring of technical elements.

The environmental factors concurring to the guarantee of the users' well-being and health are mostly related to the concentration of polluting substances in the air and on surfaces, thermo-hygrometric microclimate, lighting quality, and acoustic frequency and intensity. The EN 16798-1:2019 [1] standard groups the physical parameters to examine for the assessment of indoor

comfort into four categories: indoor air quality, thermal comfort, illumination comfort, and acoustic comfort. Each category can be assessed with hard or objective data, which can be obtained with instrumental measurements (detailed in chapter 6), and soft data, surveying users' subjective opinions. The relationships between measurable and comfort parameters are at the base of the codified environmental standards which are now in use in environmental design, with the support of tabulated values; design handbooks contain recommendations for the conservation of a specific temperature range, lighting, and noise levels, and concentration of polluting substances.

Users' opinion is at the center of the assessment model based on adaptive comfort: this approach has been defined in various research works [2, 3, 4, 5] over time, and recently has been standardized in America [6] (ASHRAE 55:2004) and then in Europe (EN 16798-1:2019). In fact, the past legislative framework was sectorial, and separately considered the different aspects of indoor

quality. Until recent times, this resulted to be restrictive for a global assessment of indoor quality: suffice to think that a single parameter could lead a significant discomfort in other areas and that a high number of subjective variables concur to the optimal state of well-being. Subjective variables depend on the way in which the human body responds to stimuli, and to each one's habits: several research works [7, 8, 9] show that people who have lived in cool environments prefer

lower temperature ranges. The sectorial conception has been overcome by a systemic human-centered vision, which incorporates users' viewpoints through expected mean value indices and dissatisfied people percentage. The adaptive comfort model [10, 11] is based on the user's capacity to manage indoor microclimate, reducing the use of technological systems while increasing the possible actions that subjects can perform to modify their energy balance.

3.1 Metodi di valutazione del comfort termoigrometrico

I parametri ideali per il confort termoigrometrico sono da tenere in considerazione sia per la progettazione degli edifici (dimensionamento delle finestre, solare ombreggiamento, massa dell'edificio, ecc.) che per i sistemi HVAC [12]. Il comfort termico è stato definito dalla ASHRAE 55-2013 “as a condition of psycho-physical well-being of the individual with reference to the environment in which he lives and works” e corrisponde, pertanto, alla piena soddisfazione psicofisica del soggetto nei confronti dell'ambiente (non desidera sentire né più caldo né più freddo). Le condizioni di comfort dipendono dall'interazione di fattori oggettivi e individuali [13, 14]. I primi sono rappresentati da quattro parametri ambientali: la temperatura dell'aria (T_a), la temperatura media radiante (T_r), l'umidità relativa (rH) e la velocità dell'aria (V_a). I fattori individuali, invece, sono rappresentati dalla resistenza termica del vestiario indossato dal lavoratore (isolamento termico CLO) e dal calore metabolico (dispendio metabolico MET) prodotto durante l'attività svolta nell'ambiente da valutare. Nessuno dei parametri ambientali di per sé considerato è un indicatore idoneo dell'ambiente termico, ma le suddette componenti, interagendo tra di loro e con le componenti individuali, determinano le sensazioni di comfort o di discomfort termico percepite dal soggetto.

La norma UNI EN ISO 7730 [15] stabilisce i parametri ideali per un buon comfort igrometrico individuando un range di valori tollerabili.

li. Il rispetto di tali valori evita l'eventuale diffusione e la sopravvivenza di virus nell'aria e il loro assorbimento attraverso la mucosa nasale. I valori di riferimento per ambienti termicamente moderati in regime invernale sono una temperatura compresa tra 19–5°C; un'umidità relativa tra il 30%–60%; una temperatura media radiante tra 18–24°C. In regime estivo: una temperatura compresa tra 23–5°C; un'umidità relativa tra il 30%–60%; una temperatura media radiante tra 22–27°C.

In termini di confort termoigrometro per ambienti moderati il riferimento per la progettazione degli ambienti confinati è la norma EN 16798-1:2019 “Prestazione energetica degli edifici – Ventilazione per gli edifici – Parte 1 e Parte 2”. Il metodo varia a seconda se è previsto nell'ambiente un sistema di raffrescamento e/o riscaldamento attivo (meccanico) e in questo caso le temperature interne devono rispettare quelle definite dal modello di Fanger [16] (UNI 7730); oppure se il comfort termico è mantenuto mediante strategie di raffrescamento passivo (senza apparecchi meccanici) e allora il limite di temperatura superiore e inferiore è imposto dal modello di Comfort Adattivo. Rispetto al modello di Fanger, il modello adattivo considera un più ampio range di temperature come “confortevoli” (da 22 °C a 28 °C) e pertanto permette una più agevole integrazione di tecnologie di raffrescamento passivo [17, 18]. Occorre, comunque, considerare che gli ambienti termici reali sono generalmente non uniformi e la velocità dell'aria non è mai costante del tempo, provocando cause di disagio localizzato in alcune zone dello spazio confinato. Ciò si con-

figura in genere per effetto di asimmetria radiante (fonti termiche concentrate su un punto o una superficie), gradiente verticale di temperatura dell'aria, pavimenti caldi o freddi, non uniformità e fluttuazione della velocità dell'aria. Riguardo il discomfort localizzato [19], la norma prescrive un'asimmetria radiante $\Delta t_r < 10^\circ\text{C}$ in corrispondenza di superfici vetrate o fredde; un'asimmetria radiante $\Delta t_r < 5^\circ\text{C}$ in corrispondenza ad un soffitto radiante; una velocità dell'aria $< 0,15 \text{ m/s}$ (inverno) e $< 0,25 \text{ m/s}$ (estate); un gradiente di temperatura tra $0,1 \text{ m}$ e $1,1 \text{ m} < 3^\circ\text{C}$ e una temperatura del pavimento compresa tra 19°C e 29°C .

3.1.1. *Modello stazionario*

Il comfort termo-igrometrico dell'individuo è definito dalla norma UNI ISO EN 7730:2005 come la condizione mentale di soddisfazione nei confronti dell'ambiente termico e coincide con lo stato in cui il soggetto non sente né caldo né freddo. Tale definizione è basata sul modello stazionario di Fanger, secondo il quale la zona di comfort può essere la stessa per tutti gli occupanti, impostando un certo range di valori termoigrometrici in tutte le stagioni e in tutti i luoghi [20, 21]. Il modello Fanger è stato ampiamente validato in caso di raffrescamento/riscaldamento artificiale ma non è stato verificato significativamente per zone calde e temperate (soprattutto dove la temperatura massima è superiore a 35°C) e in caso di ventilazione naturale [22].

Ciò può essere espletato soltanto attraverso soluzioni impiantistiche che possano riscaldare

e/o raffreddare l'ambiente meccanicamente. Questo modello deriva da un'approfondita ricerca che ha raccolto numerose indagini su persone soggette a condizioni diverse all'interno di una camera climatica, sviluppando poi, un modello matematico che mette a sistema una relazione tra i fattori ambientali e fisiologici coinvolti. L'individuo si configura passivo e non deve adattarsi al variare della temperatura poiché è sempre costante. Al fine di valutare la condizione di comfort, il modello stazionario ricorre agli indici di Voto Medio Previsto (Predicted Mean Value – PMV) e Percentuale Prevedibile di Insoddisfatti (Predicted Percentage Dissatisfied – PPD), stabiliti dei livelli di isolamento termico del corpo umano dovuto all'abbigliamento e alla consueta attività fisica svolta nell'ambiente da valutare. La zona di comfort, per la quale il PMV rientra nei limiti raccomandati ($-0,5 < \text{PMV} < +0,5$), è definita dalla combinazione di sei fattori: temperatura dell'aria, temperatura media radiante, tasso metabolico applicabile, isolamento degli indumenti, velocità dell'aria, umidità. Il PPD è un indice che stabilisce un quantitativo delle persone termicamente insoddisfatte.

Il PMV deriva dall'equazione del bilancio termico il cui risultato viene rapportato ad una scala di benessere psicofisico a 7 punti da $-3 =$ molto freddo a $+3 =$ molto caldo, compreso lo 0 che rappresenta il valore ideale, la neutralità termica. Al PMV è correlato il PPD che quantifica percentualmente i soggetti "insoddisfatti" in rapporto a determinate condizioni microclimatiche. L'indice PPD dovrebbe attenersi ad una percentuale di insoddisfatti delle condizioni

termiche (PPD) pari a $\leq 10\%$. Secondo la norma ASHRAE Standard 55-2013, invece, il valore limite di accettabilità termica prevede un PMV pari a $\pm 0,5$ corrispondente ad un PPD pari al 20% degli occupanti l'edificio, comprensivo di un 10% di persone comunque insoddisfatte per i fattori di discomfort di tipo localizzato e di un 10% di persone insoddisfatte delle condizioni termiche di tipo "globale" [23,24].

In base ai criteri selezionati è stabilito il corrispondente intervallo di temperatura operativa di progetto. Secondo la norma EN 16798-1:2019 i valori di progetto per il dimensionamento dei sistemi meccanici di raffreddamento devono essere superiori all'intervallo di comfort durante la stagione di raffreddamento (estate) e i valori per il dimensionamento dell'impianto di riscaldamento devono essere i valori inferiori della fascia di comfort. I criteri predefiniti vengono forniti dalla norma per diverse categorie che dipendono dall'uso degli spazi o da esigen-

ze di gruppi di occupanti con maggiori necessità come anziani o bambini (basso tasso metabolico e alterato controllo della temperatura corporea) per i quali sono consigliati i requisiti di categoria I. Nella categoria è incluso il livello normale utilizzato per la progettazione; la III fornirà comunque parametri accettabili; la IV potrebbe presentare qualche rischio per il benessere gli occupanti e dovrebbe essere tenuta in considerazione solo per un breve periodo dell'anno o in spazi temporanei.

La normativa per il calcolo del PMV, oltre al metodo analitico, fornisce un metodo tabellare che parte dalla conoscenza della temperatura operativa (Tabella n. 1). La temperatura operativa, misurabile direttamente con un termometro a globo nero è definita come la temperatura uniforme di una cavità in cui il soggetto scambierebbe per irraggiamento e convezione la stessa energia che effettivamente scambia nell'ambiente reale non uniforme [25].

Tabella 1 Default design values of the indoor operative temperature in winter and summer for buildings with mechanical cooling systems. UNI EN 16798-1:2019

Type of building/space	Category	Operative temperature °C	
		Minimum for heating (winter season), approximately 1,0 clo	Maximum for cooling (summer season) approximately 0,5 clo
Offices and spaces with similar activity (single offices, conference rooms, auditorium, restaurants, classrooms) Sedentary activity – 1,2 met	I	21,0	25,5
	II	20,0	26,0
	III	19,0	27,0
	IV	18,0	28,0

Note: a 50% relative humidity level and low air velocity level (<0,1 m/s) is assumed

3.1.2 *Modello adattivo*

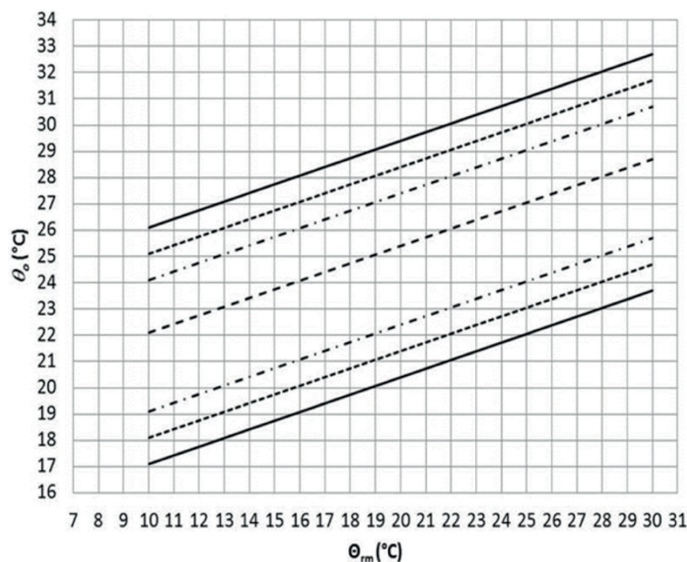
Come quello stazionario, il modello di comfort adattivo è raccomandato dalle norme europee EN 16798-1:2019 e UNI EN ISO 7730:2005 e americana ASHRAE 55 2004 anche se definito in diversi studi qualche decennio prima [26, 27, 28]. Nel modello adattivo, a differenza di quello stazionario l'occupante di un edificio non è più inteso come un soggetto passivo, ma riesce attivamente a adattarsi dal punto di vista del comfort termogrometrico. L'adattamento avviene mediante azioni di natura comportamentale, culturale, sociale, contestuale che potrebbero alterare la sensazione di benessere percepito [29]. Il modello adattivo definisce temperature di comfort maggiori e più flessibili rispetto al modello di Fanger; l'utente è in grado di termoregolare il proprio corpo, attendendosi a condizioni microlimatiche "meno stringenti" in termini di range di temperatura ritenuti accettabili, in ambienti con ventilazione naturale.

L'occupante attua un processo di graduale diminuzione delle reazioni individuali agli stimoli ambientali attuando azioni di tipo fisiologico, trascurabile in ambienti moderati; psicologico poiché le esperienze pregresse e le aspettative modificano la percezione degli stimoli sensoriali e la reazione ad essi e comportamentale, modificando i parametri che regolano il bilancio termico del corpo; può essere suddiviso in personale, tecnologico e culturale [30]. È personale, variando l'abbigliamento, la postura; l'alimentazione; è ambientale, regolando la ventilazione naturale dell'edificio; è culturale, adattando le attività alle condizioni climatiche.

Il metodo adattivo si applica solo agli occupanti con attività sedentarie senza rigide politiche sull'abbigliamento e dove le condizioni termiche sono regolate dagli occupanti principalmente attraverso l'apertura e la chiusura di elementi nell'involucro edilizio (ad es. finestre, alette di ventilazione, lucernari, ecc.). Affinché si possano determinare le condizioni di benessere, gli spazi in questione dovrebbero essere attrezzati con finestre manovrabili o componenti di facciata che si aprono verso l'esterno e che possono essere facilmente regolati, con possibilità di decisione della velocità dell'aria entrante. Inoltre, l'involucro edilizio potrebbe disporre di frangisole, ventilatori, serrande e vari tipi di schermature solari per evitare il surriscaldamento [31]. Gli occupanti considerano temperature interne diverse come confortevoli a seconda della stagione e della località e, dunque, l'abitudine al clima esterno influenza le condizioni interne e quindi la zona di comfort. La temperatura di comfort degli occupanti (T_{op}) è correlata alla temperatura media dell'aria esterna del giorno corrente (T_{rm}) secondo la seguente formula:

Temperatura operativa ottimale giornaliera/oraria $T_{op} = 0,33 * T_{rm} + 18,8$
dove: $T_{rm} = (1-\alpha) * (T_{ed-1} + \alpha T_{ed-2} + \alpha^2 T_{ed-3})$

e dove T_{ed-1} è la temperatura media esterna per il giorno precedente e T_{ed-n} è la temperatura esterna media giornaliera per l'i-esimo giorno precedente e α è una costante tra 0 e 1 (EN 16798-1:2019 consiglia di utilizzare 0,8). Si ottiene una fascia di comfort (Fig. 1) calcolata sommando



T_o = temperatura operativa indoor, °C
 T_{m} = temperature media corrente esterna °C

La linea continua indica i limiti superiore e inferiore per la categoria III

Le temperature limite variano al variare della media corrente della temperatura esterna e al di sopra di queste fasce di temperatura si presume che l'edificio sia in surriscaldamento.

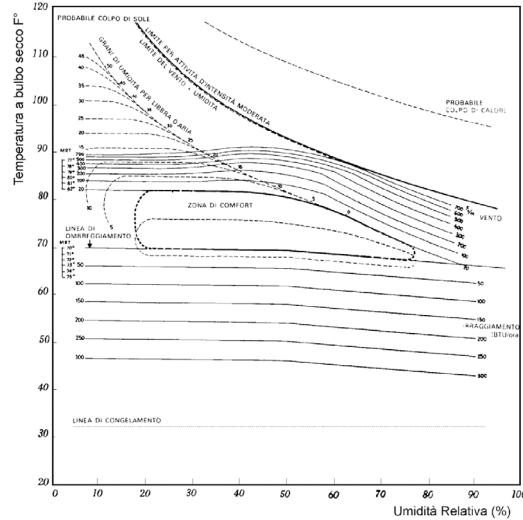
Fig. 1 Default design values for the indoor operative temperature for buildings without mechanical cooling systems as a function of the exponentially-weighted running mean of the outdoor temperature

e sottraendo alcuni gradi °C (in funzione del tipo di edificio e della categoria: +2 °C, -3 °C per la Categoria I, +3°C, -4°C per la II e +4°C, -5°C per la III.

3.1.3 Diagrammi bioclimatici

I diagrammi bioclimatici indicano un perimetro della zona di benessere termico, entro il quale la sensazione termica è giudicata confortevole da oltre l'80% delle persone [32]. I diagrammi più comunemente usati sono: il diagramma bioclimatico di Olgyay e quello psicrometrico-bioclimatico di Milne-Givoni. Il diagramma bioclimatico di Olgyay (Fig. 2) è stato definito nel 1963 con la finalità di poter stabilire una zona di comfort in cui non viene

provata alcuna sensazione di disagio [33]. Sono messe a sistema le variabili ambientali di temperatura dell'aria (nell'asse delle ordinate) e umidità (nell'asse delle ascisse) e parametri soggettivi, quali l'attività svolta e l'abbigliamento. In particolare, sono riportate le zone di benessere estive ed invernali relative ad una persona vestita in modo leggero, in attività secondaria e in ombra; la parte più in basso del diagramma descrive una condizione di sotto riscaldamento quella di sopra di surriscaldamento, al centro una zona di comfort. Il diagramma consiglia le misure operative d'intervento per migliorare la situazione di comfort; tuttavia, non rimanda ad accorgimenti sull'involucro edilizio [34]. Se un punto nel diagramma determinato incrociando il dato della temperatura e dell'umidità relativa



2

Fig. 2 Diagramma bioclimatico per gli abitanti della zona temperata degli USA, (Olgay V. 1990)

Fig. 3 Carta Bioclimatica di Givoni (Immagine di Andrea Ursini Casalena disponibile su: <https://www.mygreenbuildings.org/>)

(assumendo come costanti attività e abbigliamento) si trova al di sopra della zona di comfort, sulla destra, può essere necessario intervenire con un sistema di ventilazione (specificando il movimento d'aria ideale in m/s). Sempre al di sopra del diagramma, sulla sinistra, sono indicate le misure di apporto di vapore acqueo e ventilazione necessarie. Se un punto si trova nella parte bassa del diagramma è consigliata una certa radiazione in W/m^2 . Al centro del diagramma vi è una linea di ombreggiamento, sopra la quale è necessario provvedere alla protezione dal sole, contrariamente al di sotto situazione in cui sarebbe utile esporsi alle radiazioni solari per riscaldarsi.

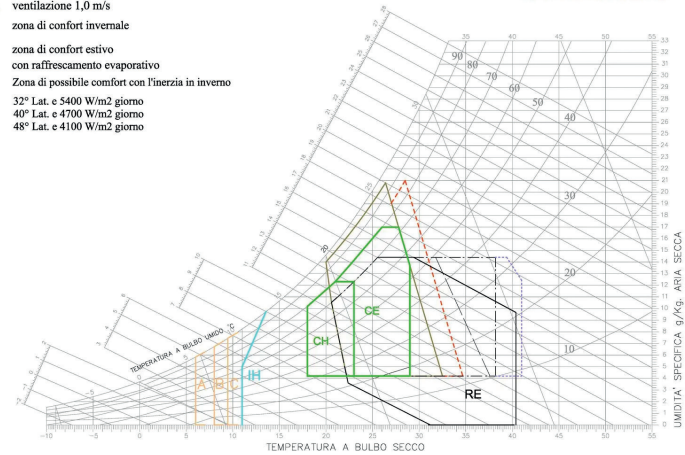
Il diagramma psicrometrico-bioclimatico di Milne-Givoni (Fig. 3) ha la finalità di prevedere le condizioni di comfort termico-igrometrico

- ventilazione notturna della massa
- ventil. notturna meccanica della massa
- massa termica elevata
- ventilazione 0,5 m/s
- ventilazione 1,0 m/s
- CH zona di confort invernale
- CE zona di confort estivo con raffrescamento evaporativo
- RE Zona di possibile comfort con l'inerzia in inverno
- IH 32° Lat. e 5400 W/m^2 giorno
- A 40° Lat. e 4700 W/m^2 giorno
- B 48° Lat. e 4100 W/m^2 giorno
- C

Carta bioclimatica di GIVONI

<http://www.myGreenBuildings.org>

Ing. Andrea Ursini Casalena



indoor in base alle condizioni climatiche esterne prevalenti [35] e scegliere le strategie progettuali perseguibili per un edificio in funzione della zona climatica di appartenenza. È impostato sul rapporto lineare tra la temperatura e la pressione di vapore dell'aria esterna, indicando i limiti delle strategie di raffrescamento e riscaldamento passive. La concentrazione più o meno densa di punti su aree specifiche del grafico permette di scegliere le strategie progettuali da applicare all'edificio che includono: massa termica, raffrescamento evaporativo, ventilazione naturale diurna e notturna, raffrescamento e riscaldamento passivo [36]. A differenza del diagramma di Olgay è presa in considerazione la temperatura dell'aria interna, inoltre la zona di comfort invernale è molto più bassa di quella estiva poiché si presuppone un vestiario più

pesante e un'attività più intensa, ci si rapporta ad un edificio privo di sistemi meccanici per la ventilazione e il raffrescamento/riscaldamento, progettato con sistemi passivi.

3.1.4 Altri metodi di valutazione dello stress termico

Esistono delle valutazioni analitiche per determinare lo stress termico in ambienti caldi e in ambienti freddi. Nel caso di ambienti caldi sia indoor che outdoor si può effettuare una valutazione preliminare mediante l'indice empirico WBGT (temperatura del globo con bulbo bagnato) mirata a comprendere se l'esposizione ad un determinato ambiente caldo genera o meno stress termico. Il metodo è normato dalla UNI EN ISO 7243:2017: "Ergonomia degli ambienti termici – Valutazione dello stress da calore utilizzando l'indice WBGT" [37]. L'indice è calcolato previa misurazione delle temperature di bulbo umido a ventilazione naturale e di globotermometro e considerando l'individuo vestito con un abbigliamento in cotone [38]. La relazione che determina l'indice è la seguente:

$$\text{WBGT} = 0,7 \cdot T_{\text{nw}} + 0,3 \cdot T_{\text{g}}$$

L'indice viene poi confrontato con i valori standardizzati di riferimento, tabellati per cinque categorie di tasso metabolico.

Sempre per la valutazione del rischio in ambienti caldi, un metodo più approfondito è il modello PHS (Predicted Heat Strain) standardizzato dalla norma UNI EN ISO 7933:2005: "Determinazione analitica ed interpretazione

dello stress termico da calore mediante il calcolo della sollecitazione termica prevedibile" [39]. La procedura di calcolo è di tipo iterativo e permette di seguire nel tempo la risposta fisiologica del corpo umano alla sollecitazione termica. È richiesta la conoscenza di base delle stesse quantità ambientali e degli stessi parametri soggettivi già elencati per la valutazione del comfort (temperatura dell'ambiente, pressione, velocità dell'aria, tasso metabolico, abbigliamento) e in aggiunta la temperatura corporea. Il modello è, inoltre, completato con le caratteristiche antropometriche (altezza, peso) e con altri elementi che intervengono nel definire l'esposizione termica dell'individuo tra i quali l'accesso ai liquidi. Sono calcolati l'andamento nel tempo della temperatura corporea e della perdita totale di acqua in percentuale rispetto alla massa corporea e in seguito confrontati con i valori limite. Confrontando gli andamenti nel tempo della temperatura corporea e della perdita totale di acqua si determina il limite di tempo massimo che il corpo riesce a sopportare in condizioni di stress termico.

Per la valutazione dello stress termico in ambienti freddi si può calcolare l'indice Insulation Required (IREQ): isolamento termico richiesto per mantenere il corpo in equilibrio termico per livelli accettabili di temperatura interna del corpo e di temperatura della pelle. La norma di riferimento per tale valutazione è la UNI EN ISO 11079:2007: "Ergonomia degli ambienti termici – Determinazione e interpretazione dello stress termico da freddo con l'utilizzo dell'isolamento termico dell'abbigliamen-

to richiesto (IREQ) e degli effetti del raffreddamento locale” [40]. La verifica del benessere termico è soddisfatta se $IREQ_{min} < I_{cl,r} < IREQ_{neutral}$

dove:

- $IREQ_{min}$ è l’isolamento termico minimo richiesto per mantenere il corpo in equilibrio termico per livelli subnominali di temperatura media interna corporea;
- $I_{cl,r}$ è l’isolamento termico associato all’abbigliamento utilizzato;
- $IREQ_{neutral}$ è l’isolamento termico minimo richiesto per garantire l’equilibrio termico.

se $I_{cl,r} < IREQ_{min}$ l’isolamento termico è insufficiente; se $I_{cl,r} > IREQ_{neutral}$ l’isolamento termico è eccessivo.

Il metodo IREQ non vaglia le caratteristiche antropometriche (altezza, peso) né degli altri elementi individuali citati sopra in riferimento al metodo PHS; richiede invece la conoscenza della permeabilità all’aria del vestiario indossato. L’indice IREQ è ricavato risolvendo l’equazione di bilancio termico rispetto ai parametri: temperatura dell’aria ($^{\circ}C$), temperatura media radiante ($^{\circ}C$), pressione parziale del vapore acqueo (Pa), velocità relativa all’aria (m/s), attività metabolica (met), isolamento termico del vestiario (clo) [41, 42]. Nel caso in cui $I_{cl,r} < IREQ_{min}$ è necessario calcolare la durata limite di esposizione al freddo e il tempo di recupero necessario per ristabilire il normale equilibrio termico del corpo.

3.2 Metodi di valutazione della qualità dell’aria

La qualità dell’aria indoor è confortevole quando non sono presenti concentrazioni di inquinanti e almeno l’80% degli utenti mostra uno stato di soddisfazione nel vivere un determinato spazio confinato. La valutazione della qualità dell’aria è un tema dibattuto già da qualche decennio: nel 1988 P. O. Fanger ha introdotto le grandezze Olf e decipol [43], con il fine di quantificare e confrontare i bioeffluenti generati dalla presenza di persone all’interno di uno spazio confinato. L’Olf (dal latino olfactus) esprime la quantità di bioeffluenti emessa da un soggetto che svolge attività sedentaria in condizioni di benessere termico. Il decipol (dal latino pollutio) è una grandezza che consente di quantificare l’inquinamento percepito in presenza di un soggetto in un ambiente con ventilazione di 10 l/s di aria pulita. I bioeffluenti umani sono, però, una fonte meno significativa di inquinamento rispetto a polveri, gas o vapori, a cui la letteratura associa la sindrome dell’edificio malato [44, 45]. Questi ultimi possono, infatti, essere scaturiti da numerose sorgenti interne e/o esterne quali aperture e/o sistemi di ventilazione e/o da elementi e materiali da costruzione che costituiscono lo spazio indoor.

Il principale riferimento per la valutazione della qualità dell’aria indoor è la norma UNI EN 16798 che, nelle sue parti 1 e 2 definisce i parametri per la progettazione e la valutazione della qualità dell’aria interna. La norma raccomanda di controllare la qualità dell’aria soprattutto in prossimità delle sorgenti di ventilazio-

ne, con una costante verifica dei sistemi di filtrazione e/o pulizia dell'aria; nonché di controllare le certificazioni che accompagnano i materiali da costruzione impiegati, esaminando eventuali caratteristiche nocive per la salute umana. L'inquinamento rimanente dopo il controllo della fonte viene trattato mediante diluizione o spostamento portate d'aria mediante sistemi di ventilazione. È consigliabile, in particolare, l'uso di sistemi passivi che generino un flusso d'aria naturale e di ventilare l'ambiente anche durante le ore non occupate dagli utenti per evitare l'accumulo di sostanze inquinanti nell'aria o su superfici.

La ventilazione degli edifici esistenti deve essere progettata in relazione alla portata d'aria necessaria, quindi alla diluizione della concentrazione degli inquinanti presenti. Le concentrazioni di inquinanti possono essere diluite mediante una diffusione dell'aria uniforme in grado di originare una movimentazione interna che coinvolga tutto l'ambiente oppure generando una ventilazione a dislocamento, in cui vi è un fronte d'aria che avanza da un lato verso l'altro dell'ambiente e che rimuove i contaminanti durante il suo moto. Nei casi di ventilazione meccanica, si devono prevedere sistemi di filtrazione e depurazione dell'aria esterna e la possibilità di controllare la portata d'aria immessa e uscente. Le linee guida di progettazione sulla depurazione e filtrazione dell'aria sono fornite dalle norme EN 16798-3:2017 [46] e ISO 16814:2008 [47].

Le indagini e le misurazioni preliminari degli inquinanti possono essere effettuate mediante gas tracciante utilizzando ad es. la CO₂ come

indicatore e identificando inquinanti specifici [48] (ad es. formaldeide, altri COV, polveri sottili PM10 o PM2,5) nonché i livelli e le potenziali sorgenti d'inquinamento (interne o esterne).

La concentrazione di inquinanti deve essere confrontata con i valori limite di salubrità e comfort: i primi si riferiscono ai livelli oltre i quali l'individuo accusa problemi di salute; i livelli limite di comfort fissano i range di contaminanti che possono indurre negli occupanti una sensazione di malessere o che possa condurre a lievi sintomi di tipo allergico [49].

Convenzionalmente la normativa europea (DIN-1946-2:1999 [50], UNI EN 16798-3:2018) riconduce le caratteristiche di salubrità dell'aria e l'inadeguatezza della portata di ventilazione a parametri relativi alla concentrazione dei livelli di anidride carbonica (CO₂), espressa in parti per milioni (ppm), stabilendo un valore limite pari a 1000 ppm per la salubrità dell'aria. Valore supportato da numerosi studi che indicano la comparsa dei primi effetti negativi per la salute, a livello cognitivo e a livello olfattivo, a partire da concentrazioni superiori per tale quantità.

La norma EN 16798-1 raccomanda tre metodi per stimare le portate d'aria di progetto:

- Metodo 1: basato sulla qualità dell'aria percepita;
- Metodo 2: usa i valori limite della concentrazione di sostanze inquinanti;
- Metodo 3: basato sulle portate di ventilazione d'aria predefinite.

Il primo metodo considera il livello di odore percepito dagli occupanti dell'ambiente in esame e tale livello corrisponde all'emissione degli in-

quinanti prodotti dagli occupanti (effluenti biologici) e dai componenti dell'edificio. La valutazione della percezione dell'utente restituisce un livello di qualità dell'aria indoor desiderato che tuttavia non deve essere inferiore al livello ideale necessario per non compromettere la salute dell'utente stesso. Quindi, qualora venissero individuate sorgenti inquinanti critiche per la salute è necessario verificare i livelli misurati mediante il secondo metodo.

Il tasso di ventilazione totale q_{tot} (l/s) dipende dalla densità degli occupanti e dal tipo di edificio poiché si calcola combinando la ventilazione necessaria per diluire e/o rimuovere gli inquinanti effluenti generati dagli utenti e la ventilazione utile per diluire e/o rimuovere gli inquinanti prodotti dagli elementi costitutivi dell'edificio, secondo la seguente equazione:

$$q_{tot} = (n \cdot q_p) + (A_r \cdot q_b)$$

dove q_{tot} è il tasso totale di ventilazione per la zona di respirazione (l/s); n è il valore di progetto per il numero di persone presenti nell'ambiente; q_p è il tasso di ventilazione per occupa-

zione per persona (l/s*persona); A_r è la superficie dell'ambiente (m^2); q_b è il tasso di ventilazione per le emissioni dall'edificio (l/s* m^2).

Il livello ottenuto dal calcolo deve essere comparato con quello predefinito dalla norma che varia in relazione al fatto che vi sono persone che non sono in grado di adattarsi facilmente a determinate condizioni ambientali (situazione più usuale negli edifici non residenziali) e persone che adattano il corpo all'ambiente circostante per il fatto che si trovano in contesti a loro più familiari (nel caso degli edifici residenziali) (Tabella n.2). Inoltre, le persone più sensibili al disagio locale sono quelle che svolgono attività leggere e sedentarie (non adattabili), mentre livelli di attività più elevati determinano un rischio di disagio locale minore in quanto le persone sono meno sensibili (adattabili).

La norma definisce dei livelli di qualità dell'aria percepita per gli edifici non residenziali, per le persone che non sono in grado di adattarsi facilmente a condizioni diverse. Nella Tabella n. 3 sono indicati i tassi di ventilazione q_p minimi necessari per la diluizione o la rimozione degli inquinanti prodotti dagli occupanti e dall'edifi-

Tabella n. 2 Basic ventilation rates for diluting emissions (bio effluents) from people for different categories

Categoria	Percentuale attesa insoddisfatta (%)	Flusso d'aria per persone non adattabili (l/s/persona)	Flusso d'aria per persone adattabili (l/s/persona)
I	15	10	3,5
II	20	7	2,5
III	30	4	1,5
IV	40	2,5	1

cio in funzione delle categorie di edificio previste dalla norma in funzione dell'uso degli spazi o delle esigenze di gruppi di occupanti con maggiori necessità. La norma seleziona i parametri in relazione alla densità di occupazione e all'emissività dei componenti dell'edificio e dei materiali di costruzione. Caratterizzano un edificio molto poco inquinante funzioni che prevedono una fruizione contenuta degli spazi e materiali che possono avere un impatto molto basso per l'ambiente: di origine naturale non miscelati con

resine plastiche e/o trattati con processi chimici [51, 52]. I valori nella seguente questa tabella, inoltre, seguono le Linee guida proposte dall'Organizzazione Mondiale della Sanità [53].

Il secondo metodo analizza le singole sostanze, valutando la diluizione necessaria per uno specifico inquinante atmosferico in termini di velocità di ventilazione richiesta per ottenere il livello di qualità dell'aria percepito desiderato. I parametri di riferimento per le sostanze inquinanti si possono trovare nelle appendici

Tabella. 3 Design ventilation rates for diluting emissions from different type of buildings

Categorie	Edificio molto poco inquinante	Edificio poco inquinante	Edificio non poco inquinante
	l/s*m ²	l/s*m ²	l/s*m ²
I	0,5	1	2
II	0,35	0,7	1,4
III	0,2	0,4	0,8
IV	0,15	0,3	0,6

della norma UNI EN 16798-1 che standardizza anche il calcolo della velocità di ventilazione mediante un bilancio di massa in regime stazionario secondo la formula:

$$Q_h = \frac{G_h}{C_{h,i} - C_{h,0}} * \frac{1}{\epsilon_v}$$

Dove Q_h è la velocità di ventilazione richiesta per la diluizione (m³/s); G_h è il tasso di generazione di una sostanza (mg/s); $C_{h,i}$ è la concentrazione inquinante della sostanza nell'ambiente (mg/m³); $C_{h,0}$ è la concentrazione di inquinanti nell'aria immessa (mg/m³); ϵ_v è l'efficacia della ventilazione. I valori di $C_{h,i}$ e ϵ_v sono tabellati per quantità di CO₂. La por-

tata di aria esterna Q_h aumenta al diminuire della differenza tra la concentrazione degli inquinanti nell'aria dell'ambiente $C_{h,i}$ e quella nell'aria immessa $C_{h,0}$; il quantitativo di aria esterna necessaria è direttamente proporzionale alla concentrazione di inquinanti nell'aria. L'inquinante più critico o rilevante deve essere identificato e deve essere stimato il carico inquinante nello spazio. Il metodo richiede che l'immissione di aria esterna nell'ambiente indoor presenti una concentrazione di sostanze inquinanti inferiore a quella dell'aria interna. Al fine di poter applicare tale metodo è necessario individuare tutte le possibili sostanze che incidono sulla qualità dell'aria, tra le quali la CO_2 , che, nello specifico, rappresenta le emissioni dovute alle persone (bio-effluenti) [54, 55] (Tabella n. 4).

Il secondo metodo è sicuramente più preciso e più articolato del primo: potrebbe risultare complesso poiché la presenza di diversi inquinanti, che presentano specifiche caratteristiche fisiche e si distribuiscono in maniera differente

nell'ambiente potrebbero determinare valori diverse dell'efficienza di ventilazione e quindi anche delle portate d'aria.

Il terzo metodo consiste nel determinare una quantità minima di portata d'aria per soddisfare sia i requisiti di comfort per la qualità dell'aria percepita che la salubrità dell'ambiente indoor. Il metodo, definito come prescrittivo, individua delle portate minime al di sotto delle quali non è possibile scendere e se quelle calcolate con il metodo prestazionale risultano più alte, per la progettazione è possibile scegliere un valore intermedio tra i due. Le portate d'aria di ventilazione predefinite (l/s per persona) (Tabella n. 5) possono essere espresse da una combinazione di uno o più delle seguenti componenti: ventilazione totale di progetto necessaria in relazione al numero di persone e componenti dell'edificio (q_{tot}); ventilazione di progetto per superficie unitaria (qm^2); ventilazione di progetto per persona (q_p); tassi di ricambio d'aria (A_{CH}); superficie delle aree di apertura (A_{tot}).

Tabella n. 4 Default design CO_2 concentrations above outdoor concentration assuming $CO_2 = 20$

Categorie	CO_2 corrispondente a valori in PPM per persone non adattabili
I	550 (10)
II	800 (7)
III	1350 (4)
IV	1350 (4)

Tabella n. 5 Default predefined design ventilation air flow rates for an office (non-adapted person)

Categorie	Tasso di ventilazione per ambiente	
	l/s*persona	l/s*m ²
I	20	2
II	14	1,4
III	8	0,8
IV	5,5	0,55

3.3 Metodi di valutazione del comfort visivo

Il comfort visivo è la condizione di soddisfazione delle esigenze visive espresse dall'utente che varia in relazione allo svolgimento di una determinata attività e deve garantire: sicurezza, per facilitare il movimento; buona visibilità, per svolgere correttamente le attività; soddisfare necessità di carattere fisiologico e psicologico. L'involucro edilizio, in relazione al confort visivo deve rispondere a requisiti di relazione visiva con l'ambiente esterno, disporre di un giusto rapporto vuoto/pieno e distribuzione delle fonti luminose naturali. Il principale riferimento, per la valutazione dell'ambiente luminoso è la norma UNI EN 12464:2021 [56] che associa la soddisfazione del benessere visivo alla performance visiva riferita alla velocità e all'accuratezza del sistema visivo nell'espletamento di un compito e alle condizioni psicofisiche degli utenti influenzati dalla resa dei colori e dall'equilibrio nella distribuzione delle luminanze

Da menzionare è anche la norma EN 15193-1:2017 [57] che correla l'effetto della luce diurna al fabbisogno energetico di illuminazione (su base mensile e annuale) anche classificando la disponibilità di luce diurna in funzione di misurazioni della luminanza degli elementi; un'eccessiva superficie finestrata oltre a conferire all'ambiente una luminosità eccedente condurre al surriscaldamento di esso.

La valutazione del comfort può avvenire da alcuni parametri di riferimento che descrivono il giusto livello di illuminamento [lux] per il periodo di svolgimento delle attività dell'utente. L'indagine avviene per mezzo di rilevamen-

ti strumentali, dai quali si esamina la quantità e qualità della luce, l'uniformità di illuminamento, la luminanza, l'indice di controllo dell'abbagliamento (UGR) [58], il colore della luce e l'indice di resa, la direzionalità della luce. Il contributo della luce diurna varia in livello, direzione e spettro, fornendo modelli di modellazione e luminanza variabili, per tal motivo le misurazioni andrebbero effettuate più volte nell'arco di una giornata. La qualità e quantità di luce naturale è determinata mediante l'indice di performance Daylight Factor, procedura raccomandata dalla CIE – Commission Internationale de l'Eclairage, per determinare le prestazioni relative all'illuminazione naturale negli edifici [59]. È il rapporto tra l'illuminamento che si ha in un punto di un ambiente per effetto delle chiusure trasparenti e l'illuminamento che nel medesimo istante si ha su una superficie piana e posta sulla copertura dell'edificio in modo da vedere tutta la volta celeste ma senza irraggiamento solare diretto. È, quindi, una grandezza che consente di valutare le condizioni di luce all'interno di un ambiente in relazione a quelle presenti all'esterno. La norma UNI 10840:2007 [60] ci guida al calcolo del fattore di luce diurna:

$$\underline{FLD}_m = \frac{\tau A}{(1-\rho_m)S_{tot}} \varepsilon \varphi \quad \text{con } \varepsilon = \frac{E_f}{M_{cielo}}$$

Dove A è la superficie vetrata; τ è il coefficiente di trasmissione del vetro dalla finestra; φ dipende dalla geometria della superficie finestrata e se questa è arretrata rispetto al filo del-

la facciata, è il fattore di riduzione del fattore finestra della finestra ε ; S_{tot} è la superficie totale delle pareti dell'ambiente (compresi soffitto e pavimento); ρ_m è il fattore di riflessione medio ponderato delle superfici dell'ambiente; E_f è l'illuminamento esterno sulla vetrata. In letteratura sono riportati altri metodi per valutare il fattore finestra che tengono conto dell'altezza del fabbricato contrapposto; dell'altezza della finestra dal piano stradale; della larghezza della strada. A partire dal D.M. 5/7/75 [61] per l'edilizia residenziale e richiamato successivamente nel resto della normativa di riferimento è disposto che un ambiente abitabile abbia almeno un FLD $> 2\%$. Il FLD è un indicatore dei livelli di illuminamento solo in riferimento alla luce naturale ed artificiale e non fornisce informazioni riguardo l'abbagliamento [62].

L'illuminamento è il rapporto tra il flusso luminoso incidente una superficie nell'intorno di un punto considerato e la superficie stessa. L'illuminamento naturale in un punto di un ambiente è insufficiente se il valore risulta $< 0,3\%$; discreto se il valore è compreso tra $0,5$ e 1% ; buono se $> 1\%$; ottimo se $> 4\%$. L'uniformità di illuminamento è il rapporto tra l'illuminamento minimo e medio nello spazio confinato in corrispondenza di un piano orizzontale (o verticale) ad una certa altezza dal pavimento. L'illuminamento è una grandezza fotometrica definita come il rapporto tra il flusso luminoso incidente su una superficie e l'area della superficie stessa [63].

La luminanza (cd/m^2) è il rapporto tra il flusso luminoso emesso o riflesso da una superficie

luminosa e la superficie emettente proiettata su un piano perpendicolare alla direzione del flusso [64]; è uno dei fattori che influenza maggiormente il confort visivo poiché è indicativa dell'abbagliamento che può indurre una sorgente. La quantità di luce emessa può essere misurata sia nel caso di apparecchi illuminanti e che di sorgenti luminose naturali e di oggetti che hanno una più o meno forte capacità di riflettere o assorbire la luce.

Il contrasto di luminanza è la causa di discomfort più usuale [65, 66], in considerazione che l'utente non è statico e può porre la propria attenzione su campi visivi diversi all'interno di un unico ambiente, un'eventuale marcata differenza di luminanza tra una zona illuminata e una no adiacente potrebbe affaticare l'utente, spingendolo a doversi concentrare su più zone diverse allo stesso tempo.

La direzionalità della luce varia in funzione della diversa inclinazione dell'angolo luminoso e gli elementi illuminati, variando la direzionalità possono apparire in maniera differente. Il colore della luce può agire a livello psicologico influenzando la gradevolezza di un ambiente e la sua resa esprime il grado di restituzione di un determinato colore da parte di una sorgente luminosa.

L'abbagliamento può essere puntuale quanto è dovuto alla presenza nel campo visivo di sorgenti con luminanze molto maggiori rispetto alle altre; generale dovuto alla saturazione del campo visivo di sorgenti con luminanza molto elevata; perturbatore quando la luminanza della sorgente impedisce temporaneamente la visione.

Le scelte architettoniche influenzano fortemente la luce in un ambiente confinato [67, 68]: oltre alla configurazione dello spazio che potrebbe prevedere anche la presenza di cortili, cavedi, lucernai, ecc. e della facciata nel rapporto tra la superficie finestrata e paramento murario, anche la scelta materica dei rivestimenti influenza la resa del campo visivo, basti pensare all'effetto di una luce incidente su superfici riflettenti (sorgenti luminose indirette).

Negli anni la ricerca ha sviluppato una serie di indici che potessero valutare il comfort visivo indoor e tutti in maniera differente tengono conto dei parametri sopradescritti, tra questi si ricordano:

- l'indice VH RATIO (Vertical-Horizontal illuminance Ratio) [69]: rapporto degli illuminamenti su due superfici verticali ed orizzontali, passanti per un singolo punto nello spazio; si calcola in funzione della direzionalità della luce, dell'estensione dell'illuminazione; delle condizioni di abbagliamento; del contrasto di luminosità;
- l'indice di prestazione UDI (Useful Daylight Illuminance) [70]: descrive un'analisi dei livelli di illuminamento naturale basata su dati climatici meteorologici orari del periodo di un anno;
- l'indice LENI (Lighting Energy Numeric Indicator): standardizzato dalla norma UNI EN 15193:2008 [71] rappresenta il consumo energetico annuo per m^2 dovuto all'illuminazione, comprendendo anche le aliquote delle apparecchiature per l'illuminazione di emergenza.
- l'indice Daylight Glare Index (DGI) [72]:

valuta l'abbagliamento da sorgente di luce naturale e si calcola in funzione della luminanza della sorgente abbagliante, della luminanza media dell'ambiente circostante a cui è sottratta la luminanza della sorgente abbagliante, l'angolo del flusso luminoso rispetto all'occhio dell'osservatore modificato al variare di un indice di posizione.

In relazione all'abbagliamento sono stati eseguiti diversi studi che hanno visto il coinvolgimento degli osservatori e questi, confrontati con gli indici di valutazione, ne hanno confermato una validità. In generale si è dimostrata una maggiore tolleranza dell'abbagliamento da luce naturale rispetto a quella artificiale ed è stata definita una relazione numerica tra gli indici di abbagliamento e i gradi di discomfort da abbagliamento, con un limite tra comfort e discomfort pari a $DGI = 22$ [73, 74].

3.4 Metodi di valutazione del comfort acustico

Il comfort acustico è la condizione psicofisica di benessere di un individuo, per la quale un campo sonoro non disturba le sue attività in atto [75]. Il comfort acustico dipende dalla combinazione di diverse variabili fisiche, oltre che da parametri soggettivi, che dipendono dalla percezione e dalla sensibilità umana. La grandezza fisica che caratterizza il suono è la pressione sonora, perturbazione, di carattere oscillatorio, con una specifica frequenza e lunghezza d'onda, generata da una sorgente sono-

ra che, propagandosi in un mezzo elastico (aria, acqua, solido, ecc.), causa una variazione percepibile dall'orecchio umano. Un'unità immobiliare può essere valutata dal punto di vista delle prestazioni di isolamento dell'involucro edilizio, considerando dei "livelli di isolamento" rispetto ai rumori provenienti dall'esterno, ai rumori aerei e da calpestio provenienti da altre unità immobiliari, ai rumori di impianti di pertinenza dell'intero edificio o di altre unità immobiliari. La norma UNI 11367:2010 [76] spiega come determinare la classe acustica di una unità immobiliare esistente sulla base di misure fonometriche eseguite sull'edificio.

Per misurare i livelli di rumorosità vengono usati degli strumenti rilevatori del livello di pressione acustica (fonometri vedi paragrafo n. 6.3) che simulano la capacità dell'orecchio umano di percepire il rumore alle varie frequenze. Tali strumenti misurano il Livello Equivalente ed il livello P Peak. Il livello equivalente (L_{eq}) di un dato suono è alla base della norma UNI ISO 1999:2015 [77] ed è il livello, espresso in dB di un ipotetico rumore costante che, se sostituito al rumore reale per lo stesso intervallo di tempo, comporta la stessa quantità totale di energia sonora.

$$L_{eq,T} = 10 \log \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{p(t)}{p_0} \right]^2 dt \right\}$$

Dove T è il tempo di misura, p(t) è la pressione sonora istantanea p₀ è la pressione sono-

ra di riferimento (pari a 20 µPa). La variazione di pressione, causata dalla propagazione di onde sonore, risulta essere molto minore rispetto alla pressione atmosferica e per tal motivo, è necessario l'utilizzo di una scala logaritmica in base dieci. Il livello (P Peak) è il picco di pressione sonora raggiunto espresso anch'esso in dB, valuta il rumore impulsivo e si determina:

$$L_{picco} = 10 \log \left(\frac{p_{peak}^2}{p_0^2} \right)$$

Ad ogni livello di pressione sonora misurato è associato una determinata percezione umana in db che esprime il possibile disturbo di un'attività, le soglie tollerabili in termini di affaticamento, danno psichico e fisico, soglia del dolore.

Nel caso di rumori discontinui si valuta il livello massimo di pressione sonora ponderata A misurato con costante di tempo slow generato da una sorgente e percepito nell'ambiente in esame. Va effettuata una rilevazione multi-spettro del livello di pressione sonora (analisi della frequenza del suono) al fine di determinare l'istante in cui il livello globale di pressione sonora ponderato A con costante slow assume il valore massimo [78]. La percezione del livello di pressione sonora dipende dalla frequenza ed è più sensibile alle frequenze medio-alte. Si fa riferimento alla trasformata integrale di Fourier: operazione matematica che permette di ottenere il contenuto in frequenza di un segnale e,

quindi, ricavare un segnale a partire da tale contenuto [79].

La normativa di riferimento per il comfort acustico si riferisce principalmente a due questioni: la prima alla valutazione del rumore presente in ambiente nell'ottica di progettazione dei sistemi di ventilazione, riscaldamento e raffrescamento come stabilito dalla UNI EN 16798-1; la seconda relativa alla valutazione delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni dei prodotti UNI EN ISO 12354-2:2017 [80]. Nello stesso edificio il rumore dovrebbe essere valutato con un campione di stanze e spazi serviti da sistemi di movimento dell'aria, finestre, orientamento e sistemi costruttivi diversi. Se un'adeguata ventilazione dipende dall'apertura delle finestre è necessario valutare anche il livello equivalente di pressione sonora nel momento in cui l'ambiente è esposto ai rumori esterni; così come se la ventilazione o il sistema di raffrescamento e/o riscaldamento sono forniti mediante sistemi attivi, la verifica è da effettuare quando le apparecchiature sono in regime. Tuttavia, la norma EN 16798-1 prevede un'analisi solo del rumore afferente ai sistemi HVAC, il rumore esterno non è contemplato. Il livello equivalente è un descrittore del rumore dovuto a sorgenti attive in condizioni operative in un arco di tempo medio-lungo ed è, infatti, ampiamente usato come descrittore del rumore di un'apparecchiatura in funzione.

La pressione sonora in presenza di un ostacolo viene in parte riflessa, in parte assorbita e in parte trasmessa e nella sua valutazione bisogna tenere conto anche di queste situazioni [81]. Gli ambienti chiusi, dove sono presenti sia sor-

genti riflettenti che sorgenti dirette creano un campo sonoro comunemente chiamato semi riverberante, cioè con una densità di energia sonora che non si riduce a zero istantaneamente ma dipende dal tempo in cui il livello sonoro prodotto decresce. Il tempo di riverbero è definito nella EN ISO 16032:2005 [82] e nella EN ISO 10052:2021 [83]. W.C. Sabine nel 1898 definì la relazione che lega il tempo di riverberazione di un ambiente rispetto al suo volume e alla superficie delle unità fonoassorbenti (legge di Sabine) [84].

Un aspetto fondamentale che influenza un ambiente chiuso è il fonoisolamento delle pareti che delimitano un ambiente chiuso dall'esterno, questo può essere calcolato sulla base del potere fonoisolante dei singoli elementi costituenti la facciata, considerando i contributi diretti (sia per via strutturale che per via aerea) e indiretti (riverbero per via strutturale) [85]. La capacità di una facciata, riferita ad uno specifico ambiente interno, di ridurre il rumore proveniente dall'esterno misurato è fortemente influenzata dagli elementi presenti e dalla forma esterna della facciata (es. presenza di balconi) che costituiscono barriere di assorbimento sonoro. La norma UNI EN ISO 12354-1 [86] contiene delle formulazioni analitiche per il calcolo previsionale del potere fonoisolante di una parete, anche multistrato previa misura in laboratorio del potere fonoassorbente di ciascun elemento. L'insieme delle caratteristiche fonoassorbenti degli strati, insieme agli elementi di facciata determinano l'indice di isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione: parametro che indica

quanti dB è in grado di attenuare la facciata di un edificio rispetto ai rumori esterni [87].

Per definire le prestazioni di isolamento rispetto ai rumori aerei provenienti da altre unità immobiliari la norma UNI 11367 [88] richiede di utilizzare il descrittore indice di potere fono isolante apparente da confrontare con i valori limite consentiti per legge (Tabella n. 6). L'indice si misura in opera attivando una sorgente di rumore in uno degli ambienti attigui rilevando il livello di pressione sonora nei due ambienti; dalla differenza dei livelli si ricava la prestazione fonoisolante.

Per definire le prestazioni di isolamento ri-

spetto ai rumori da impatto la norma UNI 11367 richiede di utilizzare il descrittore indice di livello di rumore da calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico. Tale parametro indica il livello di rumore percepito direttamente sulle ripartizioni orizzontali e la misura si esegue attivando una sorgente normalizzata di rumore da calpestio e rilevando il livello di pressione sonora nell'ambiente disturbato [89]. Per descrivere il livello di rumore nell'ambiente ricevente, esiste anche ad esempio un descrittore normalizzato sul tempo di riverberazione, in Italia però non sono definiti limiti di legge su esso.

Tabella 6 Valori limite per le classi acustiche – UNI 11367

Classe	Isolamento di facciata	Rumori aerei	Rumore da calpestio	Livello continuo eq.	Livello max discontinuo
I	≥ 43	≥ 56	≤ 53	≤ 25	≤ 30
II	≥ 40	≥ 53	≤ 58	≤ 28	≤ 33
III	≥ 37	≥ 50	≤ 63	≤ 32	≤ 37
IV	≥ 32	≥ 45	≤ 68	≤ 37	≤ 42

Bibliografia

1. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 16798:2019 Prestazione energetica degli edifici – Ventilazione per gli edifici*, **2019**
2. Humphreys, M. A., *The influence of season and ambient temperature on human clothing behaviour*. Fanger, P.O., Valbjom O., *Indoor Climate*, Danish Building Research, **1979**
3. Nicol, F., Jamy, G. N., et. Al., *A survey of thermal comfort in Pakistan toward new indoor temperature standards*. Final Report to the Overseas Development, Administration Published by Oxford Brookes University, School of Architecture, UK, **1994**
4. De Dear R.J., Brager G.S., *Developing an adaptive model of thermal comfort and preference*, ASHRAE Trans. 104, **1998**; pp. 1-18
5. De Dear, R., Xiong, J., et. Al., *A review of adaptive thermal comfort research since 19* Energy and Buildings 214, **2020**
6. *ASHRAE/ANSI Standard 55-2013*; Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers: Atlanta, GA, USA, **2013**
7. Yang, W., Wong, N. H., Jusuf, S. K., *Thermal comfort in outdoor urban spaces in Singapore*, Building and Environment, 59, **2013**; pp. 426-435
8. Halawa, E., & Van Hoof, J., *The adaptive approach to thermal comfort: A critical overview*, Energy and Buildings, 51, **2012**; pp. 101-110
9. Humphreys, M. A., Nicol, J. F., Raja, I. A., *Field studies of indoor thermal comfort and the progress of the adaptive approach*, Advances in building energy research, **2012**; pp. 55-88
10. Nicol J.F., *Adaptive comfort* Building Research & Information, 39, **2011**; pp. 105-107
11. Nicol J.F., Humphreys M.A., *Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings*, Energy and Buildings 34, **2002**; pp. 563-572
12. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 12599:2012 Ventilazione per edifici – Procedure di prova e metodi di misurazione per la presa in consegna di impianti di ventilazione e di condizionamento dell'aria*, **2019**
13. Altomonte, S., Allen, J., et. Al., *Ten questions concerning well-being in the built environment*, Building and Environment 180, **2020**
14. Wierzbicka, A., Pedersen, E., et. Al., *Healthy indoor environments: The need for a holistic approach*, International journal of environmental research and public health 15, **2018**
15. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 7730:2006 Ergonomia degli ambienti termici – Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale*, **2006**
16. Fanger, P. O., *Fundamentals of thermal comfort*, Advances in Solar Energy Technology, **1988**; pp. 3056-3061
17. Nicol, F., Roaf, S., *Progress on passive cooling: adaptive thermal comfort and passive architecture*, Advances in passive cooling **2012**; pp. 37-65
18. M. Santamouris, Kolokotsa D., *Passive cooling dissipation techniques for buildings and*

- other structures: the state of the art*, Energy Build. 57, **2013**; pp. 74-94
19. Alfano, F. D., Liotti, F., *La qualità degli ambienti confinati non industriali: il discomfort termoigrometrico*. Giornale Italiano di Medicina del Lavoro ed Ergonomia, 26(4), **2004**; pp. 401-4 S.
 20. Carlucci S., Pagliano L., *A review of indices for the long-term evaluation of the general thermal comfort conditions in buildings*, Energy Build. 53, **2012**; pp. 194-205
 21. Silva, A. S., Ghisi, E., Lamberts, R., Performance evaluation of long-term thermal comfort indices in building simulation according to ASHRAE Standard 55, Building and Environment 102, **2016**; 95-115
 22. Grosso M., *Il raffrescamento passivo degli edifici*, Maggioli Editore, **1997**
 23. Humphreys M.A., Nicol J.F. *The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments*, Energy and Buildings 34, **2002**; pp. 667-684
 24. Fanger P.O., Toftum J., *Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates* Energy and Buildings 34, **2002**; pp. 533-536
 25. Ente Italiano di Normazione, UNI EN ISO 7726:2002 Ergonomia degli ambienti termici – Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche, **2002**
 26. Raja, I. A., Nicol, J. F., et. Al., *Thermal comfort: use of controls in naturally ventilated buildings*, Energy and buildings 33, **2001**; pp. 235-244
 27. Humphreys M.A., *Field Studies of Thermal Comfort Compared and Applied*, Department of the Environment: Building Research Establishment, CP 76/75, **1975**
 28. Nicol, J. F., & Humphreys, M., *Understanding the adaptive approach to thermal comfort*, ASHRAE transactions 104, **1998**; pp. 991-1004
 29. De Dear, R., Brager, G., *The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment*, International journal of biometeorology 45, **2001**; pp. 100-108
 30. Buratti, C., Ricciardi, P., Simoncini, C., *Il benessere termoigrometrico nelle aule universitarie: Primi risultati di una campagna sperimentale presso le Università di Perugia e Pavia effettuata secondo nuove metodologie basate sul modello adattivo*. Atti del, 5, **2005**
 31. Ente Italiano di Normazione, UNI EN 14501:2021 Tende e chiusure oscuranti – Benessere termico e visivo – Caratteristiche prestazionali e classificazione, **2021**
 32. Ente Italiano di Normazione, 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, **2008**
 33. Olgyay V., Olgyay, A., *Design with climate*, Princeton: Princeton University Press, **1963**
 34. Olgyay Victor, *Progettare con il clima*, Franco Muzzio, **1990**
 35. Givoni B., *Climate and Architecture*, Applied Science Publishers, **1976**
 36. Milne M., Givoni B., *Architectural Design Based on Climate*, Watson D., Energy Con-

- ervation through Building Design, New York: McGrawHill, **1979**; pp. 96-113
37. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 7243:2017 Ergonomics of the thermal environment — Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index*, **2017**
 38. D'Ambrosio, F. R., Palella, B. I., et. Al., *Criteri di valutazione degli ambienti severi caldi: dall'indice WBGT al modello PHS (predicted heat strain)*, *Medicina del Lavoro*, 95(4), **2004**; pp. 255-274
 39. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 7933:2005 Ergonomia dell'ambiente termico – Determinazione analitica ed interpretazione dello stress termico da calore mediante il calcolo della sollecitazione termica prevedibile*, **2005**
 40. Ente Italiano di Normazione, *EN ISO 11079:2007 Ergonomics of the thermal environment – Determination and interpretation of cold stress when using required clothing insulation (IREQ) and local cooling effects*, **2007**
 41. Holmér, I., *Assessment of cold stress in terms of required clothing insulation—IREQ*. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 3(2), **1988**; pp. 159-1
 42. Griefahn, B., *Limits of and possibilities to improve the IREQ cold stress model (ISO/TR 11079). A validation study in the field*. *Applied Ergonomics*, 31(4), 2000; pp. 423-4
 43. Fanger, P. O., *Olf and decipol: New units for perceived air quality*. *Building Services Engineering Research and Technology*, 9(4), **1988**; pp. 155-157
 44. Redlich, C. A., Sparer, J., & Cullen, M. R., *Sick-building syndrome*. *The Lancet*, 349(9057), **1997**; pp. 1013-1016
 45. Burge, P. S., *Sick building syndrome*, *Occupational and environmental medicine*, 61(2), **2004**; pp. 185-190
 46. Ente Italiano di Normazione, *EN 16798-3:2017 Energy performance of buildings – Ventilation for buildings – Part 3: For non-residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems (Modules M5-1, M5-4)*, **2017**
 47. International Organization for Standardization, *ISO 16814:2008(en) Building environment design — Indoor air quality — Methods of expressing the quality of indoor air for human occupancy*, **2008**
 48. Laussmann, D., Helm, D., *Air change measurements using tracer gases: Methods and results. Significance of air change for indoor air quality*, Mazzeo, N. A., Chemistry, Emission Control, Radioactive Pollution and Indoor Air Quality, IntechOpen, **2011**
 49. De Martino A., Iacobelli C., et. Al., *L'ambiente confinato Rischio chimico fisico e biologico – Percorsi di Ricerca – Studi di Ambiente*. Università Telematica Guglielmo Marconi, **2005**
 50. DIN-Gruppe, *DIN EN 1946-2 Thermal performance of building products and building components – Specific criteria for the assessment of laboratories measuring heat transfer properties – Part 2: Measurements by guarded hot plate method*, **1999**
 51. Haghghat, F., & Donnini, G., *Emissions of indoor pollutants from building materials—*

- state of the art review*. Architectural Science Review, 36(1), **1993**; pp. 13-22
52. Gustafsson, H., *Building materials identified as major sources for indoor air pollutants. A critical review of case studies*, ETDEWEB U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, **1992**
 53. World Health Organization (WHO), *Selected Pollutants: WHO Guidelines for Indoor Air Quality*, **2010**
 54. Zhang, X., Wargocki, P., Lian, Z., Thyregod, C., *Effects of exposure to carbon dioxide and bioeffluents on perceived air quality, self-assessed acute health symptoms, and cognitive performance*. Indoor air, 27(1), **2017**; pp. 47-64
 55. Maula, H., Hongisto, V., et. A.I., *The effect of low ventilation rate with elevated bioeffluent concentration on work performance, perceived indoor air quality, and health symptoms*. Indoor Air, 27(6), **2017**; pp. 1141-1153
 56. Ente Italiano di Normazione, *EN 12464-1:2021 Light and lighting – Lighting of work places -Part 1: Indoor work places*, **2021**
 57. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 15193-1:2017 Prestazione energetica degli edifici – Requisiti energetici per illuminazione – Parte 1: Specificazioni, Modulo M9*, **2017**
 58. Gherri, B., *Daylight assessment. Il ruolo della luce naturale nella definizione dello spazio architettonico e protocolli di calcolo*, Franco Angeli Edizioni, **2013**
 59. Commission Internationale de l'Eclairage, *Daylight, International Recommendations for the Calculation of Natural Daylight*, Publication CIE no. 16 (E-3.2), **1970**
 60. Ente Italiano di Normazione, *UNI 10840:2007 Luce e illuminazione – Locali scolastici – Criteri generali per l'illuminazione artificiale e naturale*, **2007**
 61. Repubblica Italiana, Ministero della Sanità, *Decreto ministeriale Sanità 5 luglio 1975 Modificazioni alle istruzioni ministeriali 20 giugno 1896, relativamente all'altezza minima ed ai requisiti igienico-sanitari principali dei locali di abitazione*, G.u. n. 190 del 18 luglio 1975, **1975**
 62. Nabil, A., & Mardaljevic, J., *Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors*, Energy and buildings, 38(7), **2006**; pp. 905-913
 63. Spinelli, F., Terrinoni, et. Al., *Costruzione degli anni meteorologici tipici per l'illuminamento naturale (AMNTIN) per il territorio nazionale e delle curve di disponibilità di luce naturale per la stima del fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione artificiale negli edifici*. ENEA, RdS/PAR2014/085, **2015**
 64. Cinzano, P., *La valutazione dell'impatto ambientale dell'inquinamento luminoso*, Convegno Nazionale Immissioni ed Emissioni Milano, **2004**
 65. Shin, J. Y., Yun, G. Y., Kim, J. T., *View types and luminance effects on discomfort glare assessment from windows*, Energy and Buildings, 46, **2012**; pp. 139-14
 66. Waters, C. E., Mistrick, R. G., Bernecker, C. A., *Discomfort glare from sources of nonuni-*

- form luminance*, Journal of the illuminating engineering society, 24(2), **1995**; pp. 73-85
67. Mottura, G., *Progettare con la luce e il colore*, Maggioli Editore, **2016**
 68. Tucci, F., *Illuminazione naturale in architettura. Daylighting in architecture*. Altralinea Edizioni, **2021**
 69. Halonen, L., Eloholma, M., Lehtovaara, J., *Lighting control and dimensioning in integrated daylight systems*, ETDEWEB U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, **1996**
 70. Nabil, A., & Mardaljevic, J., *Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings*, Lighting Research & Technology, 37(1), **2005**; pp. 41-57
 71. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 15193:20 Prestazione energetica degli edifici – Requisiti energetici per illuminazione*, **2008**
 72. Wienold, J., *Dynamic daylight glare evaluation*, Proceedings of Building Simulation Vol. 11, **2009**; pp. 944-951
 73. Chauvel P., Collins J., et. Al. *Glare from windows: current views of the problem*, Lighting Res. Technol., 14, **1982**; pp. 31-46
 74. Carlucci, S., Cattarin, G., et. Al., *Multi-objective optimization of a nearly zero-energy building based on thermal and visual discomfort minimization using a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II)*. Energy and Buildings, 104, **2015**; pp. 378-394
 75. Oberti, I., *Il benessere acustico nell'edificio. Dai prodotti alle soluzioni tecnologiche*, Maggioli Editore, **2011**
 76. Ente Italiano di Normazione, *UNI 11367:2010 Acustica in edilizia – Classificazione acustica delle unità immobiliari – Procedura di valutazione e verifica in opera*, **2017**
 77. Ente Italiano di Normazione, *UNI ISO 1999:2015 Acustica – Stima della perdita uditiva indotta dal rumore*, **2017**
 78. Guazzotti, M., *Acustica edilizia e rumore ambientale*. Hoepli Editore, **2015**
 79. Farina, A. *Principi di analisi numerica dei segnali*, www.angelofarina.it/Public/Papers/275-Manuale-UTET-Cappdf
 80. Ente Italiano di Normazione, *EC 1-2018 UNI EN ISO 12354-2:2017 Acustica in edilizia – Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni dei prodotti – Parte 2: Isolamento acustico al calpestio tra ambienti*, **2017**
 81. Cerniglia A., *Simulazioni acustiche in un ambiente*, RCI anno XXV n.9, Tecniche Nuove, **1999**
 82. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 16032:2005 Acustica – Misurazione del livello di pressione sonora di impianti tecnici in edifici – Metodo tecnico progettuale*, **2005**
 83. Ente Italiano di Normazione, *EC 1-2022 UNI EN ISO 10052:2021 Acustica – Misurazioni in opera dell'isolamento acustico per via aerea, del rumore da calpestio e della rumorosità degli impianti – Metodo di controllo*, **2021**
 84. Sabine W.C., *Architectural Acoustics*, American Architect and Building News 62, **1898**
 85. Salter, C. M., Travis R. L., *Acoustical performance measurement protocols for commercial buildings.*, **2012**
 86. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 12354-1:2017 Acustica in edilizia – Valuta-*

- zioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni dei prodotti – Parte 1: Isolamento dal rumore per via aerea tra ambienti, 2017*
87. Granzotto, N. *Utilizzo dell'isolamento acustico normalizzato rispetto al tempo di riverberazione nelle prove in opera*, Associazione Italiana di Acustica 35° Convegno Nazionale Milano, **2008**
88. Ente Italiano di Normazione, *UNI 11367:2010*
- Acustica in edilizia – Classificazione acustica delle unità immobiliari – Procedura di valutazione e verifica in opera, 2010*
89. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 717-2:2021 Acustica – Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio – Parte 2: Isolamento dal rumore di calpestio, 2021*

Capitolo 4

Parametri e strumenti per la misurazione del comfort indoor

Chapter 4. Parameters and tools for the measurement of indoor comfort

The measurement of physical indoor parameters can occur periodically. In general, it is described in the building maintenance plan; according to the specific cases, it is relevant for the execution of global or partial building restoration intervention.

Through the codes have standardized the range of parameters for the definition of a livable indoor environment, for the sake of completeness, it is also necessary to consider some circumstances of the outdoor environment in the overall evaluation of indoor comfort, as they influence indoor parameters in a variable way according to the performance of the building envelope [1]. In the outdoor environment surrounding the building, the following aspects can be analyzed: climatic conditions, exposure, and solar radiation, water collection and disposal system, the morphology and the geological characteristics of the soil, and the presence of an aquifer.

The main legislative reference for the measurement of the parameters that affect indoor comfort is the UNI EN ISO 7726:2002 international code [2]. The code identifies two C (comfort) and S (thermal stress) classes, associating with each of them a range of measurement and tolerance, to adopt according to whether the environment is in a moderate climate, with a microclimate around the comfort standards, or is subjected to thermal stress. The measurement tools described in the code differ by the duration of the monitoring, the inclusion of software for data output, performance levels, etc. The code specifies the minimum requirements of the measurement tools and the methods for the survey of physical parameters, standardizing the information survey process. The characteristics of the tools described in the code can vary according to the use modality and the quality of the tools themselves; technicians must compare the available tools on the market, checking their compliance with the specifications of the code. The survey of physical parameters

can be performed through monitoring, at given time thresholds, of; thermo-hygrometric parameters, also including the realization of humidity maps [3]; air currents and turbulence degree; lighting degree; sonic

disturbance. The main parameters described by the UNI code are synthesized in the following Table 1.

Table 1. Parameters for thermo-hygrometric comparison and related tools, with tolerance and measurement ranges defined by the UNI code for the C class

Parameter	Measurement unit	C class (comfort)		Tools
		Measurement	Tolerance	
Air temperature	°C	From 10 to 40 °C	0.5 °C	Temperature transducer (Thermocouples, thermistor) Thermometer (resistance, liquid, solid, thermocouple, digital) Thermomanometer
Mean radiant temperature	°C	From 10 to 40 °C	2 °C	Globe thermometer Net radiometer and two-sphere radiometer
Plane radiant temperature	°C	From 0 to 50 °C	0.5 °C	Net radiometer, acoustic radiometer, 2D radiometer
Superficial temperature	°C	From 0 to 50 °C	1 °C	Contact thermometer (resistance, thermocouple) Infrared radiometer or pyrometer
Absolute (AH) and relative (RH) humidity	KPa (AH) % (RH)	From 0.5 to 3 KPa (AH)	0.15 KPa (AH)	Hygrometer (condensation, electrical conductivity, thermal conductivity, adsorption) Psychrometer
Air velocity	m/s	From 0.05 to 1 m/s	0.05 m/s	Anemometer (hot-sphere, pulsed-wire, ultrasound, laser-doppler, swinging-plate, cup, hot-wire)
Solar radiation	W/m ²	From -35 to +35 W/m ²	5 W/m ²	Pyranometer Photovoltaic pyranometer

4.1 Parametri e strumenti per la misura del comfort termoigrometrico

Per benessere termoigrometrico si intende la sensazione di soddisfazione che una persona prova nei confronti dell'ambiente termico [4]. Lo scambio termico che si instaura tra uomo ed ambiente può essere descritto mediante due variabili dipendenti dal soggetto (metabolismo, resistenza termica abbigliamento), quattro parametri microclimatiche (temperatura dell'aria, umidità relativa, velocità dell'aria, temperatura media radiante) e due variabili fisiologiche, dipendenti dal sistema di termoregolazione (temperatura della pelle e potenza dispersa per evaporazione attraverso la pelle) [5]. Le grandezze microclimatiche sono normate dalla UNI EN ISO 7726:2002, in riferimento al metodo di rilevazione e sono rilevabili direttamente mediante misurazione o indirettamente mediante altre grandezze (temperatura radiante piana, temperatura superficiale, umidità assoluta).

Il mantenimento della temperatura corporea è il risultato di un bilancio di energia e di massa dove la potenza termica prodotta dal metabolismo deve essere pari alla somma della potenza dissipata attraverso i diversi meccanismi di scambio termico (conduzione, convezione e irraggiamento) e di massa (sudorazione, traspirazione, umidificazione dell'aria nei polmoni) e del lavoro muscolare sviluppato. Dunque, oltre la temperatura, hanno un effetto diretto sul benessere termico anche l'umidità, la velocità dell'aria e l'irraggiamento dell'ambiente e indirettamente ciascuno influisce sull'altro e sulle temperature dell'aria, superficiale, radiante e piana.

4.1.1. *Temperatura dell'aria*

Definita anche temperatura a bulbo secco, contribuisce fortemente al benessere termico, indicando la temperatura dello strato d'aria che avvolge una persona [6]. È sicuramente il parametro che interviene di più nella valutazione del discomfort: la sola variazione di 1°C, della temperatura dell'aria induce una variazione del ΔPMV pari a 0,1 in condizioni tipiche di ambienti moderati ($t_a \approx 20^\circ\text{C}$, $UR \approx 50\%$, $v_a \approx 0$) e inoltre, induce una successiva variazione della temperatura media radiante e dell'umidità [7].

La strumentazione per la sua misurazione è varia: dai più comuni termometri digitali (Fig. 1a) e ad espansione liquidi e solidi a quelli a resistenza (basati sulla variazione della resistività di alcuni metalli al variare della temperatura), al termistore (Fig. 1b) (composto da un materiale semiconduttore sinterizzato che, in risposta a una piccola variazione della temperatura, mostra un'ampia variazione resistiva), al trasduttore di temperatura (Fig. 1c) (funzionante sull'effetto termoelettrico per cui una differenza di temperatura genera una differenza di potenziale) ai più datati termomanometri (basati sulla variazione della pressione di un liquido in funzione della temperatura) [8].

Durante la misurazione occorre evitare che lo strumento sia soggetto a irraggiamento o a radiazioni derivanti sia fonti di calore in prossimità. A tal fine la sonda di rilevamento può essere ricoperta da una vernice riflettente o lucidando il sensore se quest'ultimo è in metallo; si possono inoltre utilizzare uno o più schermi riflettenti, disposti tra il sensore e la fonte di

Fig. 1 Strumenti per misurare la temperatura di elementi liquidi o gasiformi.

irraggiamento. Nel caso in cui non sia possibile allontanare la sonda dalla fonte di calore si può aumentare il coefficiente di scambio termico per convezione [9], creando una ventilazione forzata intorno al sensore o scegliendo un sensore di dimensioni più ridotte possibili.

Gli strumenti di rilevazione della temperatura richiedono un certo periodo di tempo per

raggiungere l'equilibrio e restituire il risultato esatto; a tal fine la norma raccomanda una misurazione di durata pari a 1,5 volte il tempo di risposta (90 %) della sonda. La velocità di risposta dello strumento dipende dalle dimensioni, in considerazione che un termometro più piccolo ha una minore capacità termica e lo scambio termico con l'ambiente è più rapido [10].



a. Termometro digitale con display LCD.
Fonte: <https://www.woehler.it/shop/dt-310-termometro-digitale.html>



b. Sonda termistore di temperatura di elementi liquidi o gasiformi con filo conduttore.
Fonte: <https://it.omega.com/subsection/sonde-termistoriuso-generale.html>



c. Trasduttore di temperatura di elementi liquidi o gasiformi con manicotto in acciaio inossidabile.
Fonte: <https://www.directindustry.it/prod/fuehlersysteme-international-gmbh/product-59132-13967.html>

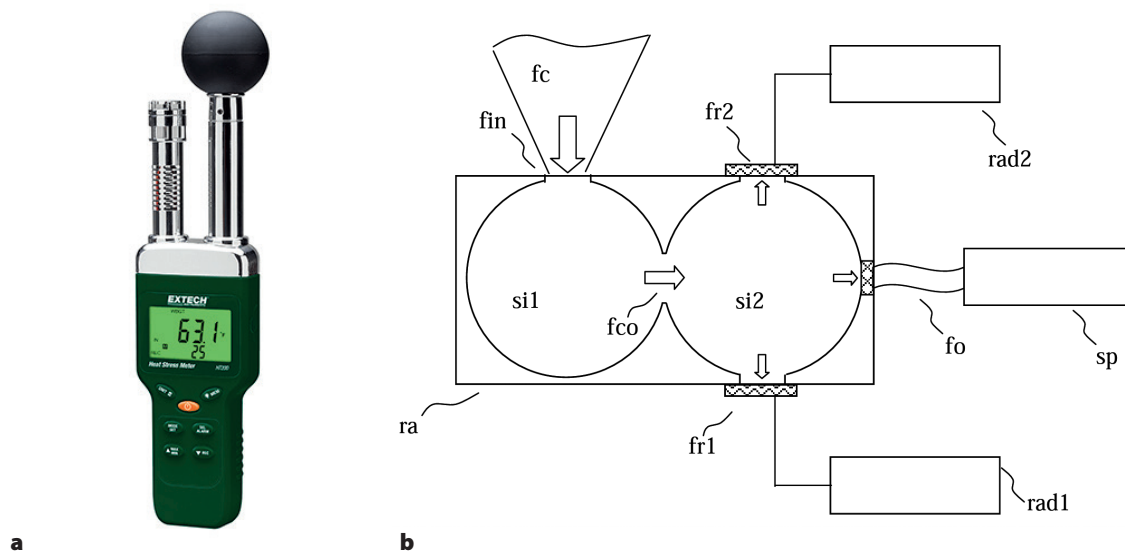


Fig. 2 Strumenti per misurare la temperatura media radiante.

a. Globotermometro idoneo per il calcolo del WBGT, determinazione dell'indice di stress da calore, misura la sensazione percepita combinando il valore di temperatura, umidità, corrente d'aria e calore irradiato.

Fonte: <https://www.extech.com/categories/thermometers/>

b. Schema generale del radiometro a doppia cavità (DCR). (fin) finestra d'ingresso; (si1) prima cavità; (si2) seconda cavità; (fco) porta di collegamento tra le due cavità; (fr1) primo fotorivelatore; (fr2) secondo fotorivelatore; (rad1) primo radiometro; (rad2) secondo radiometro; (fo) fibra ottica; (sp) spettrometro; (ra) corpo o base del radiometro a cavità.

Fonte: Parretta, A., Nenna, G., et. Al., Radiometro a doppia cavità per le alte densità di flusso luminoso, ENEA, Unità ENE-FOTO, Class.ne ENE: EGE 04056, Lab. ENEA-Portici, 2005

4.1.2 Temperatura media radiante

È la temperatura uniforme di una cavità nera fittizia nella quale lo scambio termico radiativo dal corpo umano è uguale alla stessa energia termica che scambierebbe nell'ambiente reale non uniforme [11]. Va distinta dall'asimmetria radiante che rappresenta la differenza tra la temperatura piana radiante su due facce opposte di un elemento piano.

Lo strumento di rilevazione è il globotermometro (Fig. 2a) che ricava un valore medio dai parametri simultanei della temperatura del globo e la temperatura che circonda il globo. Il globotermometro è costituito da un globo nero al centro del quale è posto un bulbo di un termometro a mercurio o una termocoppia o una sonda di resistenza [12]. Per il calcolo del radiante medio, la temperatura dipende dal dia-

metro del globo e la norma consiglia un diametro di 15 cm. Minore è il diametro del globo, maggiore è l'influenza di flussi d'aria nella rilevazione della temperatura, determinando così una riduzione dell'accuratezza della misura.

L'elevata inerzia termica del globo conferisce un tempo di risposta della rilevazione di circa 20-30 minuti che varia a seconda delle caratteristiche fisiche del globo e delle condizioni ambientali. Tale caratteristica può rilevarsi svantaggiosa per misurare la temperatura di ambienti che non hanno temperature stabili, condizionati ad esempio da correnti. Per proteggere lo strumento da un eventuale irraggiamento si applica una vernice che abbia approssimativamente la stessa capacità di assorbimento della radiazione a onde corte di persone vestite; per le onde lunghe l'emissività

consigliata è $0,95 \text{ W/m}^2$ [13]. Il globotermometro può inoltre presentare lo svantaggio di sovrastimare, a causa della sua forma sferica, i contributi radianti dovuti alle superfici orizzontali ed infine non permette di calcolare l'asimmetria della temperatura radiante. Lo strumento utilizzato per la misura di quest'ultima è il radiometro bidirezionale, dotato di due facce contrapposte, ricoperte da una pellicola di polietilene per evitare gli effetti della temperatura dell'aria, che misurano in modo indipendente la radiazione netta incidente su di esse [14].

Un altro strumento utile è il radiometro a due sfere (Fig. 2b), composto, per l'appunto da due sfere che hanno un'emissività diversa: una nera e una lucida. La sfera nera ha un'emissione di calore più alta di quella lucida e dunque c'è una differenza nell'acquisizione di calore delle due sfere e questa differenza misura la radiazione.

4.1.3 *Temperatura radiante piana*

La temperatura radiante piana è la temperatura uniforme di una cavità fittizia in cui la radianza su un lato di un piccolo elemento piano è pari a quello che si verifica nell'ambiente reale non uniforme [15]. In condizioni di eterogeneità dell'ambiente si rileva utile valutare l'asimmetria della temperatura radiante piana quale differenza dei valori della temperatura radiante piana su due facce opposte di un piccolo elemento di superficie piana.

Entrambe le grandezze possono essere misurate mediante un radiometro (Fig. 3a). Nel

caso della temperatura piana radiante si può utilizzare un radiometro "a rete" con un elemento piano di colore nero, su cui è disposto un flussometro (termopila) tra i due lati dell'elemento. L'elemento piano è protetto da eventuali scambi convettivi mediante una semisfera di polietilene che lascia comunque passare le radiazioni infrarosse [16]. Occasionalmente il radiometro da rete è dotato di un adattatore per la misura unidirezionale. L'asimmetria piana radiante può essere misurata mediante il radiometro bidirezionale, dotato di due facce identiche e contrapposte, che misurano in modo indipendente la radiazione netta incidente su di esse. È da sottolineare che nella cavità isoterma il flusso radiante che incide sulla faccia dell'elemento piano è indipendente dalla posizione dell'elemento stesso e ciò non riflette esattamente la situazione degli ambienti reali non isoterma.

La temperatura radiante piana può essere misurata anche mediante un sensore costituito da un disco riflettente (placcato in oro) e un disco assorbente (verniciato nero opaco); il primo disco prende calore per convezione mentre l'altro sia per convezione che per irraggiamento. La rilevazione avviene riscaldando entrambi i dischi alla stessa temperatura e misurando il differente apporto di calore ai due dischi che è pari al trasferimento di calore per irraggiamento tra il disco verniciato e l'ambiente [17].

4.1.4 *Temperatura superficiale*

La temperatura superficiale è la temperatura di una data superficie e contribuisce insieme alla temperatura radiante media e/o radiante piana



a



b



c

alla stima dello scambio termico radiante tra il corpo umano e l'ambiente [18]. La temperatura superficiale può essere misurata con l'ausilio di un termometro (a resistenza o con termocoppie) (Fig. 3b) da porre a contatto diretto con la superficie oppure mediante un sensore ad infrarossi. Il sensore a contatto diretto potrebbe rilevare la temperatura con difficoltà nel caso in cui vi siano superfici con bassa conducibilità termica, invece, nel caso di sensori a infrarossi le misurazioni potrebbero essere influenzate dall'emissività della superficie.

Affinché sia efficace la rilevazione del sensore di temperatura posto a contatto con la superficie è necessario che lo scambio termico tra il sensore e la superficie sia superiore allo scambio termico tra il sensore e l'ambiente. Ciò si ottiene aumentando la superficie e/o la pressione di contatto oppure interponendo tra la superficie e il sensore un composto termoconduttivo o, ancora, isolando il sensore dall'ambiente.

I radiometri a infrarossi (Fig. 3c) consentono la misurazione della superficie senza richiedere che l'oggetto osservato sia illuminato da radiazione infrarossa [19]. Esistono radiometri puntuali e a scansione (visualizzatore della variazione di temperatura su un'area) e sono classificati in base al rivelatore utilizzato: termico o fotonico. La captazione dell'energia radiante dell'oggetto osservato avviene attraverso un sistema ottico di un rivelatore a infrarossi che invia un segnale in uscita, proporzionale alla radiazione incidente, a un contatore o a un'unità di visualizzazione.

Nei rivelatori termici (bolometri a termocoppia, termofili metallici e semiconduttori), il cambiamento delle proprietà elettriche è causato dall'effetto riscaldante della radiazione incidente. Nei rivelatori di fotoni (radiometri a scansione) un cambiamento della proprietà elettrica è causato dall'assorbimento superficiale dei fotoni incidenti e poiché non vi è una richiesta di aumento della temperatura per l'attiva-

Fig. 3 Strumenti per misurare la temperatura radiante piana e la temperatura superficiale.

a. Radiometro in grado di misurare le cariche elettrostatiche su una superficie.

Fonte:

https://www.pce-instruments.com/italiano/strumento-di-misura/misuratore/radiometro-kat_1604htm

b. Termometro a quattro canali per termocoppie

Fonte:

https://it.omega.com/pptst/RDXL-SD_Series.html?pn=RDXL4SD

c. Misuratore di temperatura superficiale mediante raggi infrarossi.

Fonte: <https://www.woehler.it/prodotti>

/strumenti-di-misura

zione del sensore, il tempo di risposta è molto più breve rispetto ai rivelatori termici [20]. Un tecnico per svolgere un'accurata misurazione della temperatura superficiale deve conoscere l'emissività a onde lunghe della superficie e il campo radiante che la circonda poiché il radiometro capta la radiazione emessa e riflessa di questa.

4.1.5 *Umidità assoluta e relativa*

L'aria umida è una miscela di gas che compongono l'aria secca (ossigeno, azoto, ecc.) e vapore acqueo. A una data temperatura, l'aria non può trattenere più di una certa quantità di vapore acqueo e oltre tale quantità, il vapore acqueo si condensa. All'aumentare della temperatura dell'aria, aumenta anche la quantità massima di vapore acqueo che può contenere [21].

L'umidità relativa è il rapporto fra la quantità di vapore acqueo contenuto in una certa massa d'aria secca ad una certa temperatura e la quantità massima di vapore d'acqua che la stessa massa d'aria potrebbe contenere alla stessa temperatura (vapore saturo). È un parametro che ha un effetto lieve sul comfort indoor, incrementando il PMV di 0,06 unità in corrispondenza di un suo aumento del 10% e accresce la sensazione di freddo a seguito di una sua lieve diminuzione [22].

Va distinta dall'umidità assoluta che rappresenta la densità del vapore d'acqueo presente nell'aria. L'umidità assoluta tende ad aumentare al crescere della temperatura e può essere determinata direttamente attraverso l'uso di uno psicometro (Fig. 4a) o un igrometro al cloruro

di litio (Fig. 4b); indirettamente previo rilevamento di umidità relativa e temperatura dell'aria. Lo psicometro è costituito da due termometri affiancati e un dispositivo per garantire una ventilazione minima dei termometri: un termometro misura la temperatura dell'aria (bulbo secco) e l'altro misura la temperatura avvolto in una garza di cotone imbevuta d'acqua distillata (bulbo umido) [23]. L'evaporazione dell'acqua sottrae calore abbassando la temperatura dell'aria in misura inversamente proporzionale all'umidità: la sonda a bulbo umido misura una temperatura tanto più bassa quanto minore è l'umidità dell'aria. Dal confronto delle due temperature mediante diagrammi detti, per l'appunto, psicometrici si ricava il valore dell'umidità relativa. Nell'igrometro la soluzione di cloruro di litio assorbe il vapore acqueo, aumentando la capacità di conducibilità elettrica; quando la corrente aumenta l'acqua evapora nuovamente e nel momento in cui si stabilisce un equilibrio tra il contenuto di vapore acqueo dell'aria e la temperatura del rivelatore, quest'ultima fornisce una misura diretta del punto di rugiada o dell'umidità assoluta [24].

L'umidità relativa si può misurare mediante altri igrometri di vario tipo: sfruttando il principio di condensazione del vapore acqueo contenuto nell'aria su uno specchio raffreddato al punto di rugiada (igrometro a condensazione); misurando la variazione della capacità elettrica del sensore (igrometro a conducibilità elettrica); misurando la deformazione di alcuni materiali organici causati dalla tensione superficiale dell'acqua liquida nei pori di tali materiali (igrometro a capello) Fig. 4c).



Fig. 4 Strumenti per misurare l'umidità assoluta e relativa.

4.1.6 Velocità dell'aria

La velocità dell'aria è una grandezza definita dalla sua intensità e direzione e interviene nel comfort termoigrometrico poiché determina un trasferimento di calore per convezione e correnti d'aria [25]. Nella valutazione del comfort globale ci si riferisce al suo valore medio in intervalli di qualche secondo (periodo di misurazione), considerando l'ampiezza e la deviazione standard del vettore velocità del flusso al punto di misura considerato. Il periodo di misurazione e la deviazione standard definiscono l'intensità di turbolenza del flusso d'aria, espressa in percentuale.

Non è facile eseguire misurazioni accurate perché il flusso d'aria è turbolento e la fluttuazione casuale, cambiando intensità e direzione angolare e per questo la norma raccomanda di registrarne le fluttuazioni. Sulla persona il movimento dell'aria trasmette calore per convezione e può favorire l'evaporazione in ambienti mediamente umidi (40-50 %), con conseguente raffrescamento. La misura della velocità dell'a-

ria, convenzionalmente, avviene mediante sonde ad elemento caldo dette filo o bulbo. La velocità dell'aria insieme alle temperature dell'aria e radiante e all'umidità può essere simulata, sotto condizioni controllate, in una camera climatica investigando le reazioni fisiologiche e psicologiche di una persona al variare dei parametri indoor. Si devono considerare tre caratteristiche principali degli strumenti per misurare la velocità dell'aria: la sensibilità alla direzione del flusso d'aria; la sensibilità alle fluttuazioni di velocità; la possibilità di ottenere una velocità media e una deviazione standard della velocità su un determinato periodo di misurazione.

Per misurazioni accurate occorre calibrare lo strumento, conoscere il tempo di risposta del sensore e dello strumento e stabilirne di conseguenza il tempo di misurazione, da queste ultime, infatti, dipende la misurazione delle deviazioni standard. Uno strumento con un tempo di risposta lungo non misurerà le fluttuazioni rapide, invece, misurazioni di un flusso d'aria ad alta

a. Psicrometro per la misura dell'umidità relativa calcolata dalla differenza tra i due termometri (bulbo secco e umido).

Fonte: <https://www.pce-italia.it/html/dati-tecnici-1/psicrometro-pce-apal.htm>

b. Igrometro per la misura dell'umidità assoluta dei materiali e dell'ambiente.

Fonte: https://www.pceinstruments.com/italiano/strumento-di-misura/misuratore/misuratore-di-umidita-assoluta-kat_1003.htm

c. Igrometro a capello, misuratore dell'umidità relativa.

Fonte: https://www.ottofischer.ch/it_CH/igrometro-a-capello-111-01/i/796000115

Fig. 5 Strumenti per misurare la velocità dell'aria.

a. Sensore omnidirezionale per rilevare flussi d'aria da qualsiasi direzione.

Fonte:

<https://www.pce-italia.it/html/dati-tecnici-1/anemometro-thermo-air3.htm>

b. Anemometro a elica per misurare la velocità dell'aria (più utilizzato all'esterno).

Fonte: <https://www.pce-instruments.com/italiano/strumento-di-misura/misuratore/anemometro-kat>

c. Anemometro dotato di ventola per misure della velocità dell'aria all'interno e all'esterno.

Fonte: <https://www.pce-instruments.com/italiano/strumento-di-misura/misuratore/anemometro-kat>



turbolenza e bassa frequenza delle fluttuazioni richiederanno un periodo di misurazione più lungo [26]. La velocità dell'aria si può misurare mediante un anemometro omnidirezionale a sfera calda (Fig. 5a) che, basandosi sul principio della differenza di temperatura, è sensibile all'entità della velocità qualunque essa sia direzione oppure mediante l'uso di tre sensori direzionali che consentono la rilevazione delle componenti della velocità dell'aria lungo il percorso tre assi perpendicolari. L'anemometro omnidirezionale a sfera calda si basa sulla misura del trasferimento di calore tra un solido caldo e l'aria: la sfera riscaldata elettricamente ad una temperatura superiore a quella dell'aria, perde poi calore per convezione, rispondendo più o meno velocemente a seconda delle fluttuazioni. Esistono in commercio altri diversi tipi di anemometri distinguibili in apparecchi direzionali (Fig. 5 b, 5c) (a palette e a tazza, a filo caldo) e insensibili alla direzione del flusso (a filo pulsato, ad ultrasuoni, laser-doppler).

4.1.7 Irraggiamento

L'irraggiamento è un trasferimento di energia

termica nell'aria sotto forma di onde elettromagnetiche. È uno dei modi attraverso cui avviene la propagazione del calore, senza necessitare di un contatto per propagarsi [27]. Il flusso termico scambiato per irraggiamento tra la superficie esterna del corpo umano e l'ambiente definisce insieme ad i parametri già esposti l'equazione biunivoca fra il bilancio energetico del corpo umano e la sensazione termica e dunque, intercede nel calcolo del comfort termoigrometrico.

La quantità di riferimento per misurare la radiazione ricevuta da una persona in un ambiente indoor è il flusso di calore radiante effettivo (W/m^2), ovvero lo scambio di calore per irraggiamento tra le pareti delimitanti l'ambiente e il corpo umano [28].

Gli strumenti di misura più comuni sono i solarimetri a termopila, detti anche piranometri (Fig. 6a). I piranometri misurano la differenza di temperatura tra una superficie di colore nero ed una superficie di colore bianco oppure tra la superficie di un corpo non esposta al sole ed una esposta. Le due temperature vengono registrate da serie di termocoppie, con la possibilità di misurare in modo lineare un'ampia banda di spettro della radiazione solare (da 290 nm dell'ultra-



Fig. 6 Strumenti per misurare l'irraggiamento e il comfort visivo.

a. Piranometro, strumento che quantifica la quantità di radiazione solare incidente.

Fonte: <https://www.raig.it/piranometri-a11d/>

b. Strumento di misurazione digitale dell'intensità d'illuminazione in Lux/foot candle.

Fonte: <https://www.conrad.it/it/p/ht-instruments-ht309-luxmetro>

c. Luminanzometro, strumento che consente di misurare la luminanza di una sorgente luminosa.

Fonte: <https://www.directindustry.it/fabbricante-industriale/luminanzometro-750html>

violetto a 2800 nm dell'infrarosso IR-C). Per mezzo di un elemento semisferico di vetro al quarzo, lo strumento è in grado di misurare la radiazione globale, senza risentire dell'effetto coseno che si verifica quando il sole si allontana dalla perpendicolare allo strumento.

I solarimetri ad effetto fotovoltaico (o piranometri al silicio) convertono in energia elettrica la radiazione solare ricevuta su una superficie; la quantità di energia elettrica misura l'irraggiamento solare. Un limite dello strumento è la possibilità che la misurazione risenti dell'effetto della temperatura e per ridurre tale effetto alcuni solarimetri hanno soluzioni elettroniche che annullano tale deriva strumentale [29].

4.2 Parametri e strumenti per la misura del comfort visivo

Il comfort visivo è definito come la sensazione di benessere fisiologico e psicologico data dalla buona visibilità, per svolgere correttamente le attività e muoversi in sicurezza [30]. I parame-

tri da indagare nell'ambiente luminoso sono oggettivi e soggettivi, i primi sono chiaramente individuabili in quanto misurabili, i secondi variano a seconda del singolo utente. I principali parametri oggettivi sono l'illuminamento (la quantità e la distribuzione di luce naturale e artificiale), l'abbagliamento, il colore e la direzione della luce artificiale, presenza o meno di fenomeni stroboscopici della luce artificiale; quelli soggettivi riguardano la vista verso l'esterno e il controllo dei dispositivi di oscuramento e della luce artificiale. L'abbagliamento è la maggiore sensazione prodotta dalla luminanza all'interno del campo visuale rispetto a quella abituale e che può causare affaticamento, discomfort o perdita di visibilità [31]. Il colore è la resa cromatica della luce e si valuta facendo riferimento alle temperature delle sorgenti luminose: luci calde (2000°K); luci fredde (4000°K).

L'illuminamento è rappresentato da un valore medio in corrispondenza di un piano orizzontale ad una certa altezza dal pavimento e la distribuzione delle fonti luminose è uno dei fattori che lo influenza maggiormente [32]. La quanti-

tà di luce che ogni fonte emette è detta luminanza. Uno degli strumenti principali per la valutazione dell'illuminamento, sia con luce naturale che con luce artificiale, è il luxmetro (Fig. 6b) nel quale, durante il monitoraggio, un sensore costituito da un trasduttore (cella fotovoltaica o celle fotoelettriche) reagisce all'energia luminosa generando corrente elettrica che viene rilevata da un galvanometro e misurata in lux. La normativa di riferimento è la UNI 11142:2004 [33]. La luminanza può essere misurata da un luminanzometro (Fig. 6c), strumento che focalizza la luce proveniente da un angolo solido a sezione circolare o rettangolare su di un elemento fotosensibile. Quest'ultimo è connesso ad un apparato elettronico in grado di restituire in forma numerica un valore di luminanza.

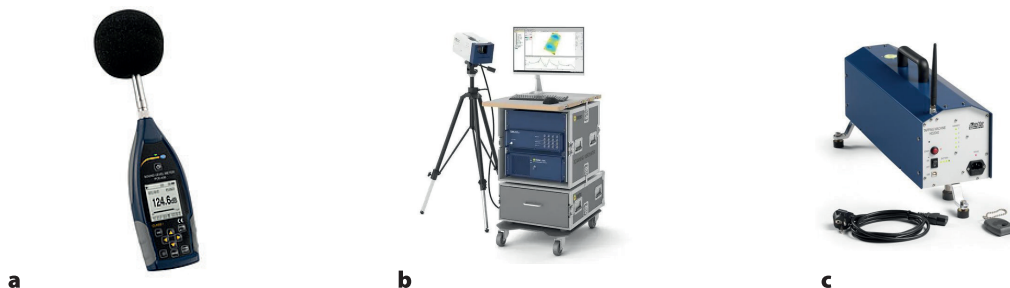
4.3 Parametri e strumenti per la misura del comfort acustico

Per disconfort acustico s'intende qualunque emissione sonora che provochi sull'uomo effetti indesiderati, disturbanti o dannosi o che determini un qualsiasi deterioramento qualitativo dell'ambiente [34]. Il comfort acustico non è rappresentato da un'unica grandezza direttamente misurabile, ma dipende dalla combinazione di diverse variabili fisiche, oltre che da parametri soggettivi, percettivi. Pertanto, per valutarlo bisogna considerare le varie componenti del fenomeno sonoro con particolarità alle frequenze troppo alte o troppo basse e, nel caso della valutazione in un ambiente indoor, al tem-

po di riverberazione, cioè la durata della persistenza del suono che si manifesta in uno spazio chiuso al cessare dell'emissione da parte della sorgente.

Un rumore può essere originato da una o più fonti esterne o interne all'edificio e quando il rumore si propaga incontrando volumi si generano vibrazioni elastiche propagate poi per via aerea, con più o meno riverbero. Altre componenti sono la pressione acustica [Pa], grandezza di tipo fisico, l'intensità acustica [W/m²] e la densità di energia sonora [J/m³], grandezze di tipo energetico. L'insieme dei valori di queste grandezze e la loro variazione nel tempo costituiscono il fenomeno sonoro, rappresentato in dB.

Il numero di variazioni di pressione sonora in un secondo è la frequenza del fenomeno sonoro e si misura in Hz. La pressione sonora può essere rilevata mediante un fonometro (Fig. 7a) regolamentato dalla norma CEI EN 61672-3:2013 "Electroacoustics – Sound level meters Part 3: Periodic tests" [35]. Il fonometro elabora la fluttuazione sonora in un segnale elettrico utilizzando dei filtri di ponderazione per rendere il segnale il più simile possibile a quello percepito dall'essere umano. Il segnale è ricondotto ad una scala logaritmica (scala di tipo A) ispirata alla curva isofonica di 40 phon dell'audiogramma normalizzato di Fletcher-Munson [36]. La grandezza fisica phon corrisponde al livello di pressione sonora a 1000Hz. Tale scala è impiegata per esprimere il comportamento del livello di pressione sonora in dB i livelli sonori che l'orecchio elabora e trasmette al cervello, tenendo conto della frequenza del suono. Altre



scales di ponderazione possono essere di tipo C (utilizzata per la misura del valore di picco massimo in ambiente di lavoro rumoroso) e di tipo Z (lineare, senza ponderazione). I filtri di ponderazione (a bande di ottava o di terzi di ottava) consentono la misurazione dello spettro sonoro e l'individuazione di frequenze alle quali il rumore è particolarmente intenso.

Studiare le vibrazioni indotte da una o più sorgenti di rumore può restituire informazioni sull'intensità sonora, sull'accelerazione delle vibrazioni, alla velocità o spostamento delle vibrazioni, definendo un'analisi modale degli elementi di chiusura dello spazio indoor e una mappatura acustica delle sorgenti. Lo strumento adatto è il vibrometro (Fig. 7b), tra i più attuali quello laser, sviluppato con un sensore di misurazione delle vibrazioni senza contatto. È costituito da una sorgente di luce monocromatica e da un interferometro, che permettono di misurare l'effetto Doppler dovuto alla vibrazione tra il segnale emesso e il segnale riflesso, deducendo la frequenza e la durata della fase di vibrazione.

In riferimento alle prestazioni degli elementi tecnologici che delimitano lo spazio indoor può essere valutata la capacità di isolamento da

rumore di calpestio di un solaio mediante una macchina normalizzata generatrice di calpestio (Fig. 7c). La macchina misura il livello medio di pressione sonora percepito in un ambiente sottostante il solaio sul quale agisce la macchina generatrice di rumori impattanti. Lo strumento è dotato di martelli in acciaio che battono sulla superficie, cadendo da un'altezza predefinita, e con una frequenza di ripetizione anch'essa normata.

4.4 Parametri e strumenti per la misura della qualità dell'aria

La qualità dell'aria negli ambienti confinati si può addurre al grado di ventilazione e alla concentrazione dei composti inquinanti presenti. La concentrazione degli inquinanti (ossidi di zolfo e di azoto, monossido di carbonio, VOC, particolato, ecc.) si può configurare associata e più o meno favorita da altre condizioni di discomfort, con particolare riferimento a quello termoigrometrico [37].

La qualità dell'aria interna può essere valutata in funzione della ventilazione, consideran-

Fig. 7 Strumenti per misurare il comfort acustico.

a. Fonometro, strumento di misura del suono del range di frequenza.
Fonte: https://www.pce-instruments.com/italiano/strumento-di-misura/misuratore/fonometro-kat_1000htm

b. Vibrometro a scansione a laser.
Fonte: <https://www.aeroexpo.online/it/prod/polytec/product-170319-244html>

c. Generatore di rumore di calpestio normalizzato, misura in opera l'isolamento acustico dei solai.
Fonte: <https://www.geass.com/macchina-di-calpestio-mod-hd2040/>

do la portata di aria esterna per ogni persona presente all'interno dell'edificio o per unità di superficie [38] e, comunemente, osservando le concentrazioni di CO e CO₂ oltre che di ciascun inquinante.

Sono diffusi strumenti per il monitoraggio dei contaminanti dell'aria, dotati di sensori che si differenziano per il range di misura e per il tipo di gas da rilevare. Il monitor di aerosol, ad esempio, riesce a captare le concentrazioni di particelle PM-10 mediante una pompa e un fotometro portatile che richiama le particelle solide e liquide [39].

Lo strumento utilizzato per la valutazione dei VOC è il campionatore d'aria diffusivo a simmetria radiale (es. radiello: campionatore passivo di forma cilindrica) (Fig. 8a). La concentrazione di inquinanti diffusa nell'aria è ricavata dalla massa depositata per assorbimento su una cartuccia cilindrica monouso diviso il tempo di campionamento. La cartuccia assorbente è custodita in una provetta in vetro. Lo strumento è dotato di un corpo diffusivo in polietilene microporoso, collegato ad una piastra di supporto in policarbonato e racchiuso in una scatola di forma cilindrica costituita da una sottile rete in acciaio inox e imballato con carbone grafitizzato. I composti che vengono analizzati sono ad esempio il benzene, il toluene, l'etilbenzene, lo xilene e alcuni composti chimici come i HCFC, CFC, Idrocarburi, aldeidi, alcoli [40].

La concentrazione sarà tanto più elevata quanto più l'edificio resiste alle infiltrazioni d'aria; la qualità dell'aria negli ambienti chiusi dipende fortemente dal tasso di ventilazione

dell'ambiente e la norma UNI EN 13829:2002 [41] definisce un'efficace tecnica per valutare le zone di maggiore permeabilità dell'involucro edilizio. La tecnica è il Blower Door Test [42] (Fig. 8b) e ha lo scopo di misurare l'ermeticità di uno spazio confinato, avendo imposto una determinata differenza di pressione tra interno ed esterno. Il test è eseguito collegando ad un particolare ventilatore uno strumento misuratore della differenza di pressione e di intensità del flusso d'aria. La forza del ventilatore è regolata in modo che sia generata tra interno ed esterno una prestabilita differenza di pressione ed è indotto un flusso d'aria che compensa le perdite di differenza di pressione dovute ad eventuali infiltrazioni d'aria nell'involucro. In una prima fase viene creata e mantenuta una depressione costante di circa 50 Pa ed è ispezionato l'involucro dello spazio confinato per individuare eventuali punti non ermetici con l'ausilio di un anemometro. Poi si genera una depressione crescente sino a raggiungere un valore finale di circa 100 Pa, registrando ad ogni passo il flusso di volume d'aria. La differenza di pressione tra due punti dell'atmosfera indica la presenza di un flusso d'aria. I valori tracciano una curva caratteristica di permeabilità dell'edificio (Building Leakage Curve) che riporta sull'asse delle ascisse le differenze di pressione indotte (Pa) tra ambiente interno ed esterno e sull'asse delle ordinate i rispettivi valori di portata (m³/h) dell'aria [43]. Il flusso d'aria misurato viene rapportato al volume dell'ambiente ispezionato e confrontato rispetto alle indicazioni di normativa per avere una caratterizzazione dell'ermeticità dell'involucro.

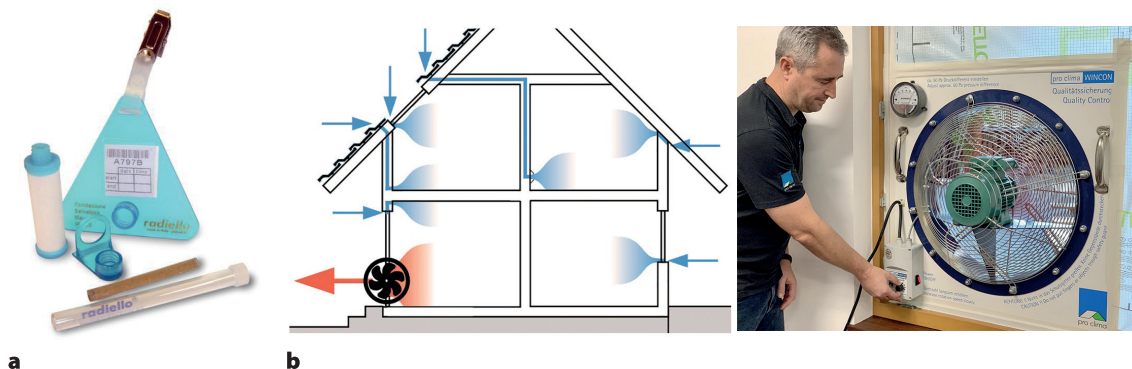


Fig. 8 Strumenti per misurare la qualità dell'aria.

a. Campionatore d'aria diffusivo a simmetria radiale.
Fonte: <https://radiello.com/it/>

b. Schema dei flussi d'aria in entrata e in uscita misurate mediante il Blower Door Test, utilizzando una ventola calibrata per generare pressione.
Fonte: <https://proclima.co.nz/blower-door/>

Un Blower Door Test valuta la tenuta all'aria solo durante l'esecuzione della prova e non tiene conto dei cambiamenti della pressione atmosferica nel tempo e di attività degli occupanti che possono influenzare i tassi di infiltrazione d'aria. Un test che rileva la permeabilità dell'involucro all'aria del lungo periodo è stato sviluppato dal Brookhaven National Laboratory del Dipartimento di Energia degli Stati Uniti [44]. La tecnica sviluppata (denominata PFT air) utilizza due dispositivi: uno che emana una piccola quantità di un gas incolore e inodore e l'altro che li assorbe. La concentrazione media di gas assorbiti è proporzionale alla tenuta all'aria dell'edificio. Tale metodo può anche rilevare la concentrazione di altri gas, come il gas radon, distribuendo più emittenti, in particolare in ambienti semiinterrati di un edificio e richiama un metodo più tradizionale per rilevare i ricambi dell'aria negli ambienti indoor a partire dalla misura della variazione nel tempo della concentrazione di un gas tracciante iniettato nell'aria stessa. Il metodo con l'utilizzo dei gas traccianti è definito nella norma americana ASTM

“Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation” [45] che raccomanda un calcolo del decadimento del gas iniettato dopo che gli occupanti hanno lasciato gli ambienti e un'analisi del periodo di accumulo prodotto durante la presenza di persone.

4.5 Strumenti multifunzione

Vi sono diversi strumenti in commercio che consentono la diretta misurazione congiunta di più parametri o la misurazione di ciascun parametro per mezzo di sonde accessorie. Uno di questi è lo strumento universale per la misura dei parametri ambientali tra i quali: velocità dell'aria, temperatura, umidità, pressione, illuminamento, calore radiante, grado di turbolenza e concentrazione di CO_2 e CO . Lo strumento può disporre di un sensore di pressione differenziale integrato e di sonde accessorie. I dati elaborati dallo strumento sono, in genere, compatibili con software per il calcolo di siste-

mi HVAC secondo EN ISO 12599 [46] e ASHRAE 111 [47] e per il calcolo degli indici PMV e PPD secondo EN ISO 7730 [48] e ASHRAE 55 [49]. È conveniente nell'utilizzo di questi strumenti considerare sempre la finalità d'uso e in funzione di questa utilizzare lo strumento diversamente: ad esempio, montato su un cavalletto all'altezza di 0,6 m per misurare i parametri di comfort immaginando un utente seduto e a poco più di 1,2 m per l'utente in piedi. Le sonde collocate nello strumento mediante appositi connettori sono diverse: sonde che misurano il grado di turbolenza e allo stesso tempo la temperatura dell'aria e la pressione assoluta; sonde a globo che ricavano la temperatura media radiante; sonde per analizzare la qualità dell'aria e che misurano contemporaneamente la concentrazione di CO₂, l'umidità, la temperatura e la pressione assoluta; sonda luxmetrica che legge il valore d'illuminamento.

Nel caso di monitoraggio in continuo è comunemente usato il data logger (Fig. 9a) che restituisce vari tipi di valori servendosi, a seconda dei modelli, di sensori interni o con la possibilità di collegarne esterni o sonde accessorie. Il data logger è un registratore di dati elettronico digitale, equipaggiato con un microprocessore ed una memoria per l'acquisizione dei dati. Vi sono alcuni di ultima generazione dotati di interfacce proprie (con tastierino e display oppure con display touch) che permettono di visualizzare i dati contestualmente alla rilevazione. Bisogna però tenere conto che per l'elaborazione completa dei dati occorre collegare lo strumento ad un PC con apposito software ed effettuare un download manuale dei dati

stessi. Questione limitante rispetto, ad esempio, ad una stazione di monitoraggio che invece può registrare e restituire i dati direttamente ad una piattaforma web associata. Tuttavia, il vantaggio di essere di piccole dimensioni ed alimentato a batteria lo configura un buono strumento per rilevare dati in luoghi privi di corrente elettrica e Wi-Fi. Tra i valori analizzabili vi sono: temperatura, umidità, pressione, suono e intensità della luce.

Tra gli strumenti più comunemente usati per un'indagine non intrusiva sugli edifici, individuando le temperature superficiali e radianti dei paramenti è la termocamera (Fig. 9b). La termocamera è una telecamera in grado di ottenere immagini o video termografiche, rilevandole mediante radiazione infrarossa emessa dall'elemento esaminato. Lo strumento restituisce una mappa di temperatura delle superfici che emettono radiazioni nel campo infrarosso quando la temperatura superiore allo 0. È utile per verificare il valore della trasmittanza dell'involucro e intercettare eventuali ponti termici, presenza di impianti e umidità. La termocamera può restituire la temperatura di ogni singolo punto inquadrato, ma le immagini sono difficili da interpretare se il fattore di emissione è sconosciuto; dunque, è sempre importante definire i parametri di emissività della superficie e temperatura dell'ambiente. Le termocamere più prestanti dispongono di sensori raffreddati (con celle peltier o pompa stirling) in silicio amorfo o in ossido di vanadio; resta comunque uno strumento meno preciso rispetto ad un termometro a contatto per superfici, in parti-

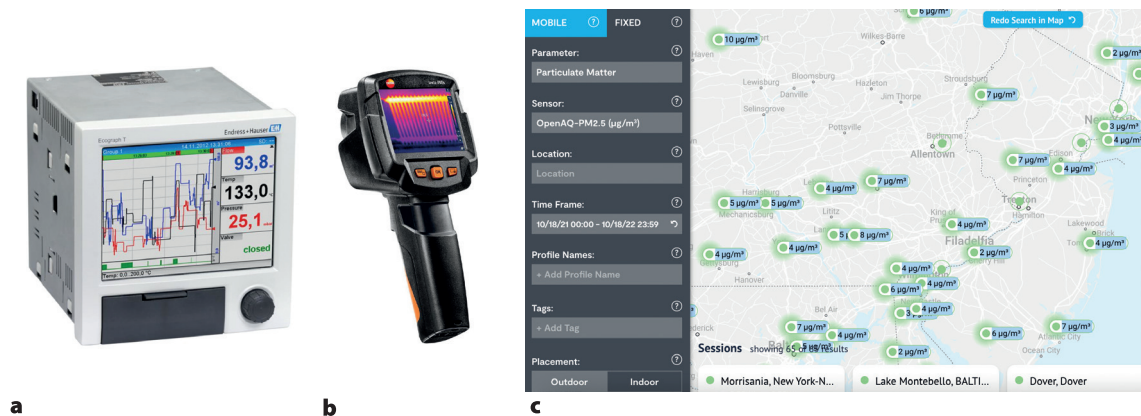


Fig. 9 Strumenti multifunzione

a. Data manager e data logger per il monitoraggio di processo.

Fonte: <https://www.it.endress.com/it/panoramica-strumentazione-da-campo/Prodotti-sistema-data-manager/data-manager-memorie-dati>

b. Termocamera, strumento in grado di acquisire immagini mediante radiazione infrarossa.

Fonte: <https://www.testo.com/it-IT/testo-865s/p/0560-8650>

c. Estratto della piattaforma di visualizzazione di dati ambientali open source captabili mediante il dispositivo Airbeam e un'App per smartphone che rimanda ad un sistema di mappatura condivisa.

Fonte: <https://www.habitatmap.org/aircasting>

colare in condizioni climatiche ventose, con alto irraggiamento, o nel caso di superfici umide.

Di ultima generazione e per un uso diffuso, anche non tecnico, vi sono dispositivi associati a piattaforme di visualizzazione di dati ambientali open source e gestibili da applicazioni per smartphone. Uno strumento tra questi è AirBeam di HabitatMap [50, 51], dispositivo portatile, collegabile allo smartphone mediante Bluetooth e in grado di misurare temperatura, umidità e particolato PM1, PM2,5 e PM AirBeam utilizza un metodo basato sullo scattering

luminoso per la determinazione del particolato: il dispositivo emette una luce che colpendo le particelle si disperde nel flusso d'aria, la quantità di luce dispersa è proporzionale alla misura del particolato. I dati possono essere registrati mediante un'applicazione, sulla piattaforma AirCasting (Fig. 9c) che restituisce un sistema di mappatura online [52, 53]. Quest'ultima, raccogliendo le misurazioni di altri dispositivi nel mondo, è uno dei più grandi database open source di misurazioni della qualità dell'aria raccolte dalla comunità.

Bibliografia

1. Sanna, A., Ciribini, A. L. C., et. Al., *La mappatura dei dati su consumi energetici e condizioni di comfort di un edificio esistente attraverso la modellazione informativa*. In Colloquiate 2018, Edicom Edizioni, **2018**; pp. 736-745.
2. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 7726:2002 Ergonomia degli ambienti termici – Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche*, **2002**
3. D'Ambrosio Alfano, F. R., D'Agostino, V., *La misura dei parametri termoigrometrici: un esame critico della normativa esistente*, Lo stato dell'arte 3: III congresso nazionale IGIIC, Palermo, 2005: volume degli atti, **2006**; pp. 250-255.
4. Buratti, C., Ricciardi, P., et. Al., *Comfort termoigrometrico in ambienti interni: correlazioni tra valori sperimentali e modelli matematici*. In Proceedings of (Vol. 62). <http://www.crbnet.it/File/Pubblicazioni/pdf/13pdf>
5. Calvino, F. M., Scaccianoce, G., Simone, A., *Comparazione delle formule per il calcolo dell'area del corpo umano nudo ai fini della valutazione del benessere termoigrometrico*. In 6° Congresso Nazionale CIRIAF Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana, **2006**; pp. 153-159.
6. Zanoni, B. *Allegato A*. Firenze University Press, **2006**; pp. 1000-1015.
7. INAIL, *La valutazione del microclima. L'esposizione al caldo e al freddo: quando è un fattore di discomfort, quando è un fattore di rischio per la salute*, Collana salute e sicurezza, **2018**
8. Locci N., *Misure di temperatura*, Complementi di misure, **2005**
9. Repetti, G., *Coefficiente di scambio termico per convezione naturale ed irraggiamento combinati*. ICP-MILANO-, 28(10), **2000**; pp. 179-180.
10. American Society for Testing and Materials, *MNL12-4TH-EB, Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement, Fourth Edition, Sponsored by ASTM Committee E20 on Temperature Measurement*, **1993**
11. Casale A., Arpino F., et Al. *Caratterizzazione del metodo di misura della temperatura media radiante e dell'asimmetria radiante mediante tecnica termografica*. 15th CIRIAF National Congress Environmental Footprint and Sustainable Development, **2015**
12. Aparicio, P., Salmerón, J. M., et. Al. *El termómetro de globo en estudios de confort y medioambiente en los edificios*. *Revista de la construcción*, 15(3), **2016**; pp. 57-66.
13. Lucchi, E. *Diagnosi energetica strumentale degli edifici: Termografia e analisi non distruttive-Normativa e procedure operative*. Dario Flaccovio Editore, **2014**
14. Aparicio, P., Salmerón, J. M., et. Al. *The globe thermometer in comfort and environmental studies in buildings*. *Revista de la Construcción*. *Journal of Construction*, 15(3), **2016**; pp. 57-66.
15. D'Ambrosio Alfano, F., Dell'Isola, M. et. Al. *La misura della temperatura media radian-*

- te. Congresso Nazionale ATI **2006**; pp. 285-290.
16. Marino, C., Nucara, A., Pietrafesa, M., *Thermal comfort in indoor environment: Effect of the solar radiation on the radiant temperature asymmetry*. Solar Energy, 144, **2017**; pp. 295-309.
 17. Medola, M., *Prestazioni termiche dell'involucro edilizio*. Costruire in laterizio, (118), **2007**; pp. 62-67.
 18. Gordon, R. G., Roemer, R. B., Horvath, S. M., *A mathematical model of the human temperature regulatory system-transient cold exposure response*. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, (6), **1976**; pp. 434-444.
 19. De Luca L., Cardone G. e Carlomagno G.M., *Misura di flussi termici convettivi con un radiometro a scansione nell'infrarosso*, Aerotecnica Missili e Spazio, 68, **1989**; pp. 48-56.
 20. Migliaccio, M., Gambardella, A., *Uno studio sul miglioramento della risoluzione spaziale dei radiometri a scansione. Uno studio sul miglioramento della risoluzione spaziale dei radiometri a scansione*, **2004**; pp. 1000-1004.
 21. Pahl, G., *Riscaldamento naturale della casa*. Franco Muzzio, **2006**
 22. Ghaffarianhoseini, A., Berardi, U., *Thermal performance characteristics of unshaded courtyards in hot and humid climates*. Building and Environment, 87, **2005**; pp. 154-168.
 23. Buratti, C., Milone, A., et. Al., *Determinazione degli indici PMV/PPD attraverso misure strumentali e questionari nel modello adattivo*. VI Convegno Nazionale del Centro Interuniversitario di Ricerca sugli Agenti Fisici, **2006**; pp. 7-8.
 24. Dell'Isola, M., & Arpino, F. *La misura dell'umidità*, Dipartimento di meccanica strutture ambiente e territorio – Università di Cassino <https://www.pasqualepetrilli.it/PascPedia/Tecnologia/BiblioPsicrom/misuraumidita.pdf>
 25. Poluzzi V., Ricciardelli S., et Al., *Monitoraggio della qualità dell'aria, studio della turbolenza atmosferica e simulazione di dispersione di inquinanti nel centro storico di Bologna*, http://www.arpa.emr.it/cms3/documenti/ecosistemi/Report_Azeglio.pdf.
 26. Langiano, E., Lanni, L., et. Al., *La qualità dell'aria negli edifici scolastici progettati ad hoc e in edifici abitativi riadattati*. Ig. Sanità Pubblica, **2008**; pp. 64, 53.
 27. Lechner, K., *L'irraggiamento*. In Elettrodinamica classica, Springer, 2013; pp. 225-267.
 28. Alfano, F. D., Liotti, F., *La qualità degli ambienti confinati non industriali: il discomfort termoisometrico*. Giornale Italiano di Medicina del Lavoro ed Ergonomia, 26(4), **2004**; pp. 401-415.
 29. Zerlaut, G., *Solar radiation instrumentation*. Solar Resources, R. L. Hulstrom, Ed., The MIT Press, **1989**; pp. 173-308.
 30. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 12464:2021 Luce e illuminazione – Illuminazione dei posti di lavoro*, **2021**
 31. Gherri, B., *Daylight Assessment. Il ruolo della luce naturale nella definizione dello spazio architettonico e protocolli di calcolo*, Franco Angeli Edizioni, **2013**
 32. IESNA. *Lighting Handbook. Lighting Design*

- Guide. Reference & applications.* IES – Illuminating Engineering Society of North America. 10th Edition, **2011**
33. Ente Italiano di Normazione, *UNI 11142:2004 Luce e illuminazione – Fotometri portatili – Caratteristiche prestazionali*, **2004**
 34. Repubblica Italiana, Ministro dell'ambiente, *Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 1° marzo 1991 Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno*, GU Serie Generale n.57 del 08-03-1991, **1991**
 35. Comité Européen de Normalisation, *EN 61672-3:2013 Electroacoustics – Sound level meters – Part 3: Periodic tests*, **2013**
 36. International Organization for Standardization, *ISO 226:2003 Acoustics — Normal equal-loudness-level contours*, **2003**
 37. Mazzucchelli, E. S., *Ventilazione come strategia integrata per il comfort indoor e per il contenimento dei consumi. Uno strumento operativo per una buona qualità del progetto*. BE-MA Editrice, Modulo 393, **2015**
 38. Belleri, A., *La qualità dell'aria negli edifici scolastici*, EU-Projektmesse-Fiera progetti UE Europa bist du, **2019**
 39. Bonadonna L, Briancesco R, et. Al. *Strategie di monitoraggio dell'inquinamento di origine biologica dell'aria in ambiente indoor*. Roma: Istituto Superiore di Sanità Rapporti ISTISAN 13/37, **2013**
 40. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 16000:2015 Aria in ambienti confinati*, **2015**
 41. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 13829:2002 Prestazione termica degli edifici – Determinazione della permeabilità all'aria degli edifici – Metodo di pressurizzazione mediante ventilatore*, **2002**
 42. Keefe, D., *Blower door testing*. Journal of Light Construction, **2010**; pp. 1-7.
 43. Ask, A. C., *Ventilation and air leakage*. ASHRAE journal, 45(11), **2003**
 44. Brookhaven National Laboratory, *Perfluorocarbon Tracers (PFTs)*, <https://www.bnl.gov/s-safe/perfluorocarbon.php>
 45. American Society for Testing and Materials, *ASTM D6245-18 Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation*, **2018**
 46. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 12599:2012 Ventilazione per edifici – Procedure di prova e metodi di misurazione per la presa in consegna di impianti di ventilazione e di condizionamento dell'aria*, **2019**
 47. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *ASHRAE STD 111 – Measurement, testing, adjusting, and balancing of building HVAC systems*, **2008**
 48. *BS EN ISO 7730:2005; Ergonomics of the Thermal Environment—Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria*. BSI: London, UK, **2005**
 49. *ASHRAE/ANSI Standard 55-2013; Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers: Atlanta, GA, USA, **2013**
 50. Siddique, A. B., Kazmi, R., et. Al. *An Intel-*

- ligent and Secure Air Quality Monitoring System Using Neural Network Algorithm and Blockchain*. IETE Journal of Research, **2022**; pp. 1-14.
51. HabitatMap, *Taking Matter into Your Own Hands: About AirBeam*, <https://www.habitatmap.org/airbeam>
52. Fraisl, D., Campbell, J., et. Al. *Mapping citizen science contributions to the UN sustainable development goals*. Sustainability Science, 15(6), **2020**; pp. 1735-1751.
53. HabitatMap, *AirCasting is an open-source environmental data visualization platform*, <https://www.habitatmap.org/aircasting>

Parte III

Il comfort indoor nel patrimonio costruito.

Tecnologie

Parte III. Indoor comfort in the built environment. Technologies

Heating, cooling, and ventilation make up the main energy consumption in the built environment, with a huge effect on energy supply, and relevant consequences on atmospheric pollution. The building sector consumes a high quantity of resources, which are non-renewable by 50% and derive from complex industrial processes. In Europe, 40% of the total energy production is estimated to be consumed by buildings. The Directive (EU) 2018/844 shows the need to decarbonize energy sources and sensibly reduce consumption by 2030. Various architectural technologies could improve the building system by managing the relationship between needs and performances in a sustainable vision. Just look at the past to understand the climatic adaption capacity of architecture, and the possibility to use available natural resources to develop passive technologies

for the fulfillment of users' well-being conditions in indoor environments.

Part III of the present volume examines the state of the art of the technological aspects of architecture for the achievement of a salubrious and comfortable, in compliance with the Sustainable Development Goals of the European Union. It analyses technological solutions for indoor microclimate control from antiquity to the present day, with a focus (in chapter 2) on nature-based solutions which have become diffuse in the retrofit interventions on the built environment in the last few years. The need for a parsimonious use of resources, together with the individuation of new goals of environmental compatibility, leads to prefer the employment of technical elements and construction materials with little damage to users' health. For this purpose, bio-based elements and materials, generated from natural waste, are examined, studying their benefits for the salubrity of indoor spaces.

The recent development and technologies in the field

of architecture and engineering have led to the rise of the so-called smart buildings, developed to guarantee the fulfillment of the users' well-being needs, especially in their living environment. The last focus of this part is on the examination of domotics and

control technologies for the automatic management of the building, with an interest in the perspectives of thermo-hygrometric, visual well-being, and air quality in the indoor environments of existing buildings.

Capitolo 1

Soluzioni per il miglioramento del comfort indoor nella storia dell'architettura

Chapter 1. Solutions for the improvement of indoor comfort in architecture history

The literature shows that mankind has an extraordinary adaptive capacity to the climatic context, compounded by a peculiar intelligence in the realization of buildings to guarantee him a condition of well-being when carrying out his daily activities, using available natural resources. Microclimate control has always represented a necessary condition to fulfill his needs, especially concerning thermo-hygrometric comfort and good air quality. Over the course of history, heating, cooling, and ventilation have had a complementary role in architectural design. On this matter, it must also be noted that a building worked as a unitary architectural-technological whole at least until the 18th century, that is until technological systems took an autonomous configuration [1].

Over the course of history, technological solutions for indoor microclimatic control have focused both on the environmental system (spatial-volumetric configurations) and on the technological one. This has involved the building envelope first, through double envelope systems, air cavities, but also specific design solutions for the roof covering, the covering of partition walls, but also gardens and parts adjoined to the building.

Passive cooling is a natural solution for air conditioning, which mainly makes use of air convection motions and geothermal principles to reduce internal temperature. Over the history of architecture, there have been solutions for indoor cooling since ancient times, in Mediterranean civilizations, mainly due to the presence of arid or temperate climates, with the goal of protecting from the heat in the summer [2]. Several solutions for passive climatic control with variable effectiveness are also widespread and well-known in Islamic regions:

depending on the season, these are characterized by hot-dry or hot-humid climates, with significant thermal shifts; hence, there the technologies are mainly aimed at repelling incoming heat and dispersing the one that is already present in the indoor spaces [3].

The main characteristic of traditional settlements is the integration of different elements: first, the socio-cultural aspects and aesthetic-formal needs strongly influence the employment of environmental control devices. These are closely related to technical and structural aspects, the use of materials, which are usually local, and the construction culture, which derives from ancient and sedimented knowledge.

Archaeological investigations and ancient sources that we have inherited, together with well-known

architectural examples until the pre-industrial age, have highlighted the presence – and co-presence – of several solutions for building indoor comfort based on natural physical laws, and mainly aimed at ventilation. Here are some examples: - air humidification systems with water in fountains, reservoirs, and channels; - design of the orientation, with specific climatic exposure of indoor spaces; - house typologies with elements aimed at the climatic function (courtyards, porches, and turret structures); - consistent wall width for thermal insulation, and use of insulating materials. These solutions are compounded by the importance of vegetation surrounding the buildings: in addition to shading, it performs water transpiration and hence produces natural cooling by evaporation.

1.1 Tecnologie per il raffrescamento passivo

1.1.1. *Raffrescamento ventilativo*

Le tecniche tradizionali di raffrescamento ventilativo sono caratterizzate per la captazione diretta del vento e per l'attivazione della circolazione dell'aria, con aperture o da moti convettivi generati da una differenza di temperatura. Tali misure hanno lo scopo di migliorare il livello di temperatura interna degli ambienti, ma anche di limitarne l'umidità e per tale motivo sono le più diffuse nei contesti climatici caldi. La soluzione con la disposizione delle aperture poste su fronti opposti sfrutta le differenze di pressione e di temperatura tra due punti distinti dell'edificio, ottenendo un ricambio d'aria e un effetto di raffrescamento se l'aria attraversa un percorso che la umidifica [4].

La predisposizione di aperture sulla parte alta delle pareti per evacuare l'aria calda tramite moti convettivi è molto comune negli edifici del mondo islamico.

Anche la realizzazione di corti e patii negli edifici costituisce un sistema complesso di raffrescamento sfruttando la ventilazione, l'ombreggiamento ed il raffrescamento evaporativo. Il patio, diffuso nell'area mediterranea e medio-orientale, grazie ai moti convettivi, agisce come un camino di ventilazione richiamando l'aria calda degli ambienti interni e migliorando l'ambiente microclimatico nelle ore diurne, in attesa che l'aria fresca notturna torni a rinfrescare l'edificio [5].

I sistemi di ventilazione possono anche riguardare la diretta movimentazione dell'aria, attraverso una differenza di pressione e tempe-

ratura all'interno degli ambienti, come per la ventilazione incrociata, l'effetto camino e l'utilizzo delle torri del vento. Le torri del vento sono tutt'oggi considerate uno dei sistemi di raffrescamento passivo più funzionale: ventilano gli ambienti interni per l'azione congiunta di convezione ed evaporazione in quanto l'aria entrante spinta sopra un canale d'acqua o in un condotto interrato nel terreno profondo si abbassa di temperatura e l'aria calda, più leggera, tende a salire verso l'alto e uscire dalle aperture della torre [6].

Tipico sistema di ventilazione dell'antico Egitto e poi acquisito anche nel mondo persiano e arabo è il Malqaf: intelaiatura posta sulla superficie estradossale della copertura con aperture solo alle estremità orientate verso la direzione del vento prevalente in modo da sfruttare il movimento d'aria per differenziale di pressione e per convezione [7]. Il suo uso è diffuso nelle città densamente costruite, con l'obiettivo di catturare dall'alto le correnti più fresche e incanalarle verso il basso, all'interno dell'edificio, mediante l'apertura rivolta verso i venti dominanti. L'idea di captare il vento dall'alto scaturisce dal fatto che al di sopra dell'edificio, rispetto al livello del suolo, l'aria contiene una minore quantità di sabbia e polvere comunemente trasportate dai venti nelle regioni con caldo secco [8].

Durante la notte la massa muraria tipica del Malqaf assorbe il calore dell'aria contenuta nella torre e l'aria più densa e raffreddata scende all'interno dell'edificio; durante il giorno, l'inerzia termica del paramento murario mantiene la temperatura più bassa e in presenza di

vento, questo processo è accelerato. Lo skyline del Pakistan è caratterizzato da migliaia di elementi cattura vento, tutti allineati e orientati nella stessa direzione del vento prevalente.

Costruito in maniera più massiccia rispetto al Malqaf, il Bâdgir svolge la funzione di catturare i venti prevalenti a seconda delle condizioni del vento e dell'ora del giorno. Esistono diverse versioni, più o meno complesse nel loro funzionamento [9].

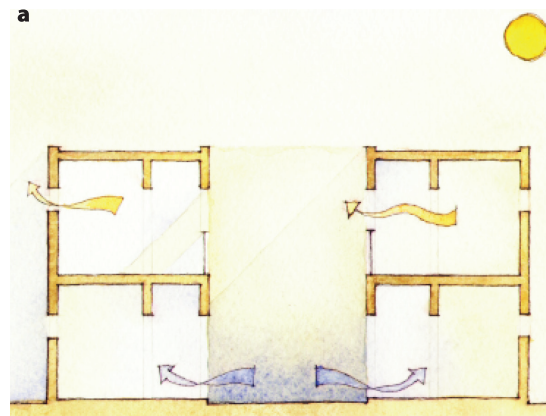
L'estremità inferiore del Malqaf è il qa'a, sala, in genere, situata di fronte al cortile privato delle case tradizionali egiziane. L'architetto Hassan Fathy, che ha voluto riproporre i sistemi costruttivi tradizionali in chiave moderna nelle sue architetture, compone la qa'a di tre ambienti [7]: uno centrale a tutt'altezza e due laterali di altezza inferiore, di cui uno, quello settentrionale, sormontato dal Malqaf. Il meccanismo di ventilazione è innescato dalla differenza di pressione che si instaura grazie alla diversa morfologia degli ambienti: l'aria catturata dal Malqaf

giunta nel qa'a tende a salire per un effetto dovuto ad una differenza di temperatura e quindi di pressione, che ha luogo nella parte più alta del vano [10]; quest'ultima c.d. lanternino si caratterizza per diverse aperture alcune delle quali schermate da superficie vetrate così da riscaldare l'aria per effetto serra e innescando un meccanismo di estrazione sollecitato dall'aumento di differente temperatura.

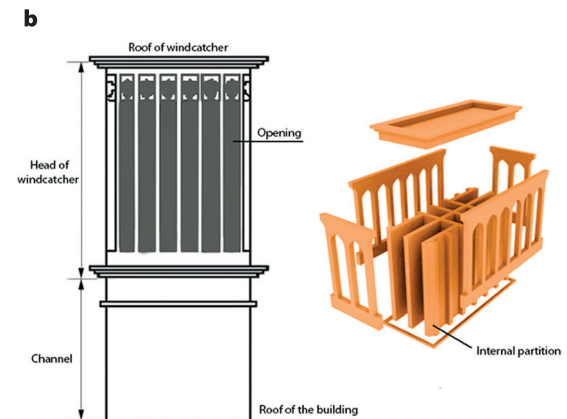
1.1.2. Il raffrescamento geotermico

Il raffrescamento passivo geotermico prevede lo sfruttamento della coibenza termica del suolo, basandosi sul fatto che la temperatura del terreno al di sotto alcuni metri di profondità, è pressoché stabile per tutto l'anno e pari alla media delle temperature annuali. Tale situazione consente di utilizzare il terreno come sorgente di raffrescamento o riscaldamento (a seconda della stagione) attraverso condotti d'aria collocati in profondità quali scambiatori di calore.

a. Edificio a patio mediterraneo. L'aria fresca si stratifica in basso e penetra negli ambienti del piano terra. La differenza di temperatura tra zone in ombra e zone soleggiate crea un raffrescamento per convezione. Fonte: Moretti, G., 2007 [5]



b. Schema degli elementi di una torre del vento. Fonte: Jomehzadeh, F., Nejat, P., et Al., 2017 [6]



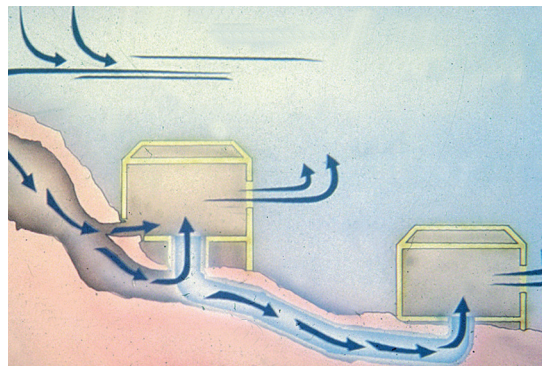


a

Il raffrescamento geotermico può essere diretto, se avviene per contatto tra involucro e terreno, come negli edifici ipogei, o ibrido indiretto, se realizzato attraverso condotti interrati, ad aria o ad acqua.

La ricerca di riparo nel sottosuolo o in ambienti rocciosi accomuna le prime comunità umane a partire dalle epoche preistoriche fino ad oggi, tale necessità determinata da diverse motivazioni è individuata in un'area geografica molto ampia che comprende le regioni medio-orientali mediterranee e dei paesi dell'est europeo [11]. La vita nel sottosuolo era organizzata in modo da poter consentire diverse necessità: difensive, mancanza di materiale e facilità costruttiva; era particolarmente vantaggiosa la possibilità di sfruttare la massa termica del terreno per la termoregolazione naturale del microclima interno.

Gli insediamenti ipogei, gli ambienti e le strutture ipogee rappresentano una valida strategia del controllo delle temperature. Nell'architettura classica, sono rintracciabili tra ambienti ipogei il criptoportico e i ninfei, talvolta arricchiti da



b

vegetazione e bacini d'acqua [12], che raffrescavano il microclima interno. Altro esempio è l'insediamento rupestre di Gravina di Puglia che si caratterizza per l'articolata rete di cunicoli e grotte, spesso connesse tra loro [13].

Noti esempi di controllo microclimatico che sfruttano un ambiente ipogeo sono le Ville rinascimentali di Costozza, nel territorio vicentino, nelle quali è convogliata l'aria dei covoli, grotte presenti nel territorio [14], collegando gli ambienti sotterranei delle ville con i cosiddetti cunicoli ventidotti della lunghezza di qualche centinaio di metri. Dagli ambienti sotterranei l'aria fresca penetra nei locali del piano terra attraversando rosoni di pietra o di marmo traforato realizzati nei pavimenti. La chiusura o apertura di griglie poste a protezione delle aperture nei pavimenti permettevano una certa regolazione della condizione dei livelli termoigrometrici dell'ambiente interno. Tale rete di condizionamento naturale fu realizzata nella metà del 1500 in altre ville del Veneto: Villa da Schio, Villa Cà Molina, Villa Trento Carli e Villa Aeolia [15].

L'approvvigionamento di aria refrigerata

a. Eremo di San Cassiano, Colli Berici.
Fonte: <https://www.colli-berici.it>

b. Schema della ventilazione proveniente dai covoli situati sotto le ville di Costozza.
Fonte: Gallo, C., 1995. [14]

a. Abitazioni ipogee di Matmata in Tunisia.
Fonte: <https://www.envi.info/i/le-case-sotterranee-di-matmata/>

b. Villaggio di Rhoufi nell'Aurès algerino.
Fonte: <https://www.alge-riatourisme/>

c. Qanat Gesuitico Alto a Palermo: galleria con soffitto a due falde con pareti rivestite in blocchi di pietra calcarea; galleria con arco in mattoni pieni.
Fonte: Lofrano, G., Carotenuto, M. et. Al., 2013 [21]

d. Abitazioni ipogee a Gharyan in Libia.
Fonte: Abo-Elazm, F., & Ali, S., 2017 [19]



a



b



c



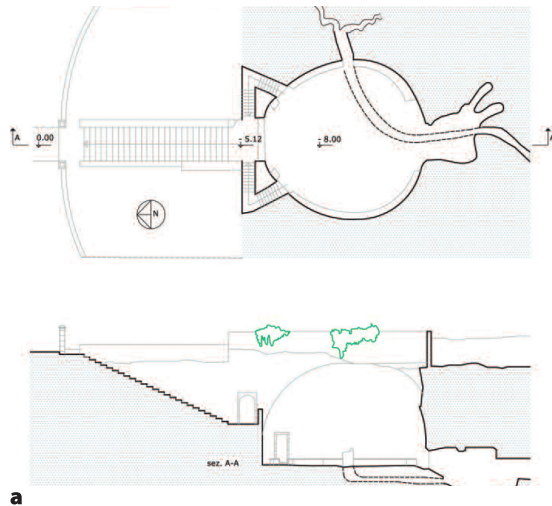
d

proveniente dai covoli è sicuramente più antico e lo si ritrova sempre nel vicentino nei Colli Berici. Tra gli esempi più noti è l'eremo di San Cassiano. L'eremo è inserito nella parete rocciosa del monte della Croce di Lumignano ed è stato eretto inglobando i resti dell'antica chiesa di San Cassiano del VI-VII secolo [16], quest'ultima costruita in corrispondenza di un covolo che fungeva da abside.

Tra le strutture ipogee di rilievo sono le abitazioni troglodite a patio di Matmata in Tunisia, dove ai fattori di tipo climatico e ambientale si

uniscono le forti necessità di difesa [17]. L'insediamento di Matmata è realizzato con la tecnica sottrattiva, ovvero le abitazioni sono costruite nel terreno di pietra arenaria e organizzate intorno a dei patii a pozzo scavati per una profondità di una decina di metri. Dai patii si diramano gallerie ipogee, su uno o due livelli, che ospitano i locali domestici.

Il villaggio di Rhoufi nell'Aurès algerino, oggi abbandonato, rientra nella casistica dell'architettura ipogea, è un tipo di insediamento che, seppure realizzato fuori terra e non con tecnica



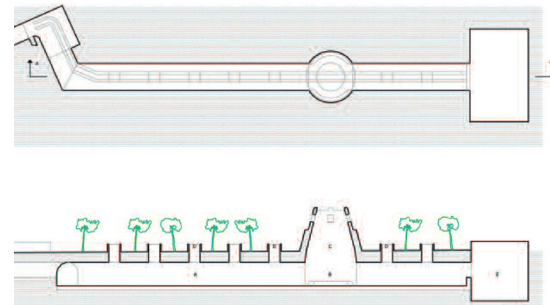
a

sottrattiva, sfrutta le favorevoli condizioni di riparo naturale, in particolare dai venti, offerte dai versanti di canyons formati dall'azione erosiva dei corsi d'acqua e dalla geologia del sito [18].

Le case di Gharyan in Libia sono abitazioni scavate duemila anni fa, fondendosi con i pendii rocciosi del luogo. La massa del terreno mantiene costante la temperatura interna dei vani, che risulta così fresca d'estate e calda d'inverno, e protegge dai venti carichi di sabbia delle regioni desertiche [19].

Interessanti strutture di raffrescamento passivo attraverso condotti interrati, sono le Camere dello Scirocco costituite da sale ipogee, preferibilmente poste vicino a sorgenti d'acqua, come quelle realizzate a partire dal XV secolo al di sotto o in prossimità di palazzi e ville palermitane.

Le camere dello scirocco sono strutture ipogee che traggono ispirazione dai sirdáb persiani; un antico esempio di tale struttura è stato



b

rinvenuto tra le rovine del palazzo del califfo di Damasco (724 d.C.), Hisham ibn 'Abd al-Malik, nel sito archeologico di Gerico, ma è possibile visitarne alcuni anche nella città siriana di Aleppo [20]. Le camere dello scirocco potevano essere refrigerate da un sistema di condotti d'acqua sotterranei, i qanat, diffusi nei paesi del Mediterraneo e del Medio Oriente, che per gravità portano l'acqua dalle falde acquifere delle colline alla pianura [21].

Le camere dello scirocco sono comparse a Palermo tra il XVI ed il XVIII secolo, presso ville di campagna o collocate al di sotto dei palazzi di città della nobiltà locale e la loro tipologia costruttiva risente dell'influenza araba e delle memorie architettoniche romane insieme alle tradizioni locali siciliane [22]. Le camere dello scirocco palermitane sono locali sotterranei realizzati per mitigare per l'appunto le calde giornate di vento di scirocco. Esse sono prevalentemente a pianta quadrata o circolare e sono

a. Pianta e sezione della camera dello scirocco di Villa Savagnone. Restituzione grafica di Carmelo Bustinto.

Fonte: Firrone, T., 2014 [22].

b. Pianta e sezione della camera dello scirocco di Villa Ambleri-Naselli. Restituzione grafica di Carmelo Bustinto.

Fonte: Firrone, T., 2014 [22].

delimitate da pareti spesse di roccia calcarenite in grado di mantenere costante la temperatura dell'aria dell'ambiente interno.

Le camere dello scirocco venivano realizzate preferibilmente laddove vi era l'attraversamento di un corso d'acqua, naturale o artificiale, non molto profondo, al fine di poter intercettare il passaggio dell'acqua fresca che evaporando contribuiva al raffrescamento dell'aria all'interno [23]. Inoltre, la corrente d'aria generata dal flusso dell'acqua in movimento spingeva il calore verso l'alto della volta che copriva la camera e nella quale era praticata un'apertura che fungeva da aspiratore per condurre l'aria calda all'esterno, fornendo altresì luce all'ipogeo.

Si ricorda la Camera dello Scirocco di Villa Naselli Ambleri costituita da due gallerie, di cui una lunga 51 metri, coperta da volta a botte ed illuminata da sette aperture di aereazione, che ospita a metà circa della sua lunghezza un ambiente circolare sormontato da una struttura tronco conica aperta alla sommità [24]. Al centro delle gallerie vi è una canaletta in cui scorrono le acque della sorgente di Ambleri che, al termine del loro percorso, giungono in un vano sotterraneo posto in prossimità dell'ingresso della Villa. Nella Camera si osservano due tipi di raffreddamento dell'aria: il primo generato dallo scambio di calore per contatto tra l'aria proveniente dall'esterno e le strutture murarie più fredde e umide; il secondo dato dalla presenza dell'acqua della sorgente che scorre nella canaletta. Il sistema di raffreddamento è ulteriormente migliorato dalla presenza di pozzi di ventilazione lungo

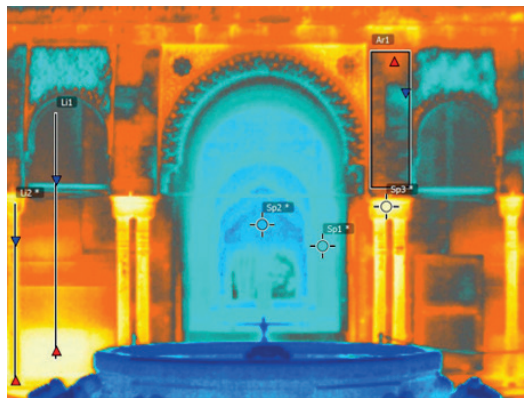
la galleria e dall'ambiente tronco-conico, che innescano moti convettivi.

Un altro esempio è, sempre nel palermitano, la camera dello scirocco di Villa Savagnone, in contrada Altarello, che si caratterizza per essere una camera a cielo aperto. La camera è costituita da una cavità circolare scavata nella roccia ed è accessibile attraverso una scala che supera un dislivello di circa 9 metri [25]. Alla base della parete rocciosa vi è un bacino che accoglie le acque di una piccola cascata proveniente dalle vicine sorgenti del Gabriele che, convogliate all'interno di catusi incassati nella roccia scendevano dall'alto aumentando il refrigerio del luogo.

1.1.3 Il raffrescamento evaporativo

Il raffrescamento evaporativo si ottiene attraverso il principio di evaporazione dell'acqua che, durante il passaggio dallo stato liquido a vapore, sottrae calore all'ambiente, agendo sul controllo microclimatico. Si tratta di una reazione endotermica: l'acqua assorbe energia dal calore dell'aria, con una conseguente diminuzione della temperatura dell'aria proporzionalmente all'aumento del suo contenuto di vapore acqueo. Sono numerosi gli esempi che fin dall'antichità impiegano sistemi per produrre uno scambio di calore tra l'aria e un volume di acqua, un canale, una cisterna o altro, determinando in questo caso sia un riscaldamento o un raffrescamento, sia una umidificazione dell'aria e aumentando quindi il benessere percepito nell'ambiente.

La presenza dell'acqua si riscontra sia all'in-



a

terno che in prossimità degli edifici in vasche e bacini, cisterne, pozzi, fontane ma anche falde idriche sotterranee. Le fonti classiche fanno riferimento ai ninfei, arricchiti dalla presenza dell'acqua, concepiti come luogo dove rifugiarsi nelle giornate più afose [12]. In molti casi, una cisterna ricavata al di sotto di un ambiente, oltre a configurarsi come sistema di approvvigionamento idrico, serve anche come un regolatore termico e, nell'area mediterranea, un espediente comune è, per l'appunto, la cisterna interrata.

Nel mondo islamico e nei paesi influenzati dalla cultura araba, alla ventilazione dell'aria si somma l'effetto refrigerante ottenuto dall'acqua presente in fontane e *salsabil*, cisterne e canali presenti nei condotti sotterranei [26]. L'aria che lambisce l'acqua evapora e aumenta il suo grado di raffreddamento e di umidità ed entra in circolo negli ambienti interni grazie ai moti convettivi innescati dai *Malqaf* e dalle torri del vento.

Il raffrescamento evaporativo è ricorrente



b

nella tradizione abitativa islamica a partire da semplici accorgimenti quali: la frequente e abbondante bagnatura del pavimento delle corti interne e l'inumidimento di panni, lenzuola e teli (tessuto della *punkah*) da appoggiare a pareti e finestre; questi, attraversati da correnti d'aria, favorivano un immediato refrigerio [27].

Osservando le reazioni prodotte dalla vaporizzazione dell'aria non satura a contatto con l'acqua, con l'affinarsi delle tecniche costruttive l'acqua diviene elemento caratterizzante dell'architettura: è raccolta in vari elementi di arredo (vasche d'acqua, pozzi, fontane) e le sue proprietà condizionano la morfologia degli edifici che si vanno articolando per sfruttarne la capacità di raffrescamento. Molti esempi sono presenti nell'architettura moresca, tra i più conosciuti al mondo l'Alhambra a Granada.

Negli edifici arabi tradizionali, le fontane sono generalmente ubicate nella corte esterna. Il tipico modello è in marmo decorato e geometricamente derivato dall'iscrizione di un poligono ottagonale o con più lati in un quadrato

a. Immagine termografica del prospetto frontale alla fontana Los Leones Alhambra, Granada. In corrispondenza della fontana e degli ambienti interni le temperature sono fresche.

Fonte: <https://www.eseficiencia.es/alhambra-granada-monumento-eficiencia-energetica>

b. Alhambra, Granada. Patio de Los Leones con fontana e canali d'acqua a pavimento verso gli ambienti interni.

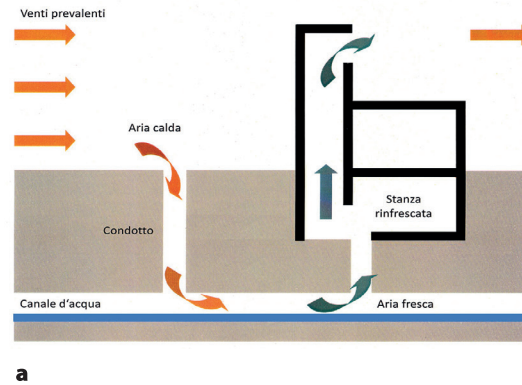
Fonte: <https://www.alhambra.org/it/>

a. Schema di ventilazione di una tipica abitazione del modo islamico con torre del vento e pozzo sotterraneo che collega un corso d'acqua che scorre in un qanat ad un piano interrato.

Fonte: <https://www.laterizio.it/cil/tecnologia/41-climatizzazione-naturale-dalla-cultura-islamica-ottimi-spunti.html>

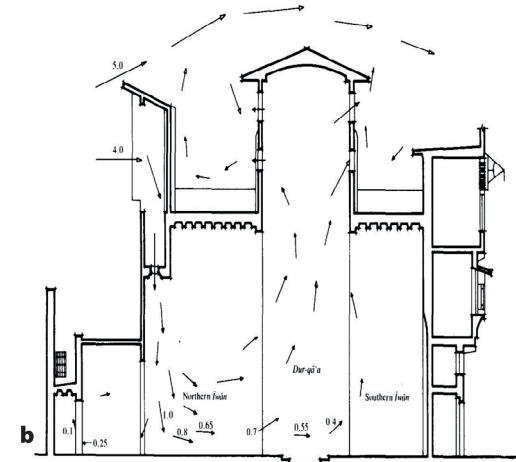
b. Schema di ventilazione di edificio con Malfa e salsabil.

Fonte: Fathy, H, 1986 [7]



[26]. Le architetture sono inoltre arricchite con la predisposizione di corti e giardini alberati attorno alle dimore, di chioschi e strutture leggere posti sul percorso del vento ma senza ostacolarne il flusso. Il salsabil, tipica delle abitazioni islamiche, è una fontana verticale in posizione lievemente obliqua costituita da una lastra di marmo intarsiata e lavorata in bassorilievo, con motivi ornamentali a onde ricorrenti che evocano l'acqua ed il vento. La lavorazione della lastra determina punti di stazionamento dell'acqua che favoriscono il suo processo di evaporazione. Il ruolo centrale del salsabil nello spazio interno delle abitazioni è anche affermato dall'architetto egiziano Hassan Fathy che lo paragona al focolare nelle zone temperate, benché l'una serva a raffreddare e l'altra a riscaldare [28].

Spesso il raffrescamento evaporativo si combina con altre metodologie di raffrescamento, di ventilazione, di protezione solare, come av-



viene per esempio nelle corti e nei patii di molti edifici dell'area mediterranea e orientale. Tra le realizzazioni, significative sono il Palazzo della Zisa a Palermo, oltre i qanat arabi e le camere dello scirocco.

Il palazzo della Zisa a Palermo è considerato uno degli esempi più emblematici di architettura bioclimatica con raffrescamento evaporativo. Residenza estiva della famiglia reale i cui caratteri costruttivi sono ereditati dalla dominazione islamica avvenuta tra il IX e l'XI sec. fu edificato nel XII sec. nella campagna nord-occidentale della città e circondato da un giardino arricchito con un corso e bacini d'acqua [29]. L'edificio distribuito su tre elevazioni presenta, accanto ai consueti accorgimenti sulla disposizione delle aperture e sullo spessore murario, una sala principale al piano terra in posizione centrale aperta verso il vestibolo, detta Sala della Fontana, con sviluppo verticale pari a due piani. Sulla parete



a

occidentale della sala è collocata la fontana che da un salsabil versava acqua nello shadirwan, una lastra inclinata lavorata a chevron, creando l'effetto dell'acqua in movimento [26]. Il pavimento della sala è attraversato da una canaletta in cui scorre l'acqua della fontana raggiungendo una vasca all'esterno con lo scopo di sottrarre calore agli ambienti interni. Sui lati corti del palazzo sono stati realizzati dei condotti di ventilazione a completamento del sistema di raffrescamento. Due torrette addossate al corpo principale e il ritrovamento durante i lavori di ripristino di un cavedio nella parete esterna dei vani sud, ha fatto ipotizzare a diversi studiosi che si trattasse di una soluzione di raffrescamento passivo simile, per concetto e struttura, alle torri del vento utilizzate nei paesi islamici. Inoltre, a favorire la ventilazione interna sono le monofore, piccole e contrapposte, ubicate sulla parte alta delle pareti perimetrali dei vani e lungo il corridoio lato ovest, che consentono l'evacuazione dell'aria calda e producono un lieve e continuo flus-



b

so d'aria. Il giardino intorno al palazzo contribuisce a creare zone ombreggiate, a ridurre la radiazione incidente sul fabbricato e a raffrescare le brezze provenienti dal mare [29].

1.1.4 I sistemi di protezione dalla radiazione solare

I sistemi di protezione dalla radiazione solare hanno come obiettivo quello di ridurre gli effetti dell'incidenza del sole, per evitare il surriscaldamento sia dell'edificio, sia degli spazi dell'interno.

Insieme alla scelta dell'orientamento dell'edificio, alcune delle strategie possibili più comuni sono: l'inserimento di elementi aggettanti orizzontali e verticali in corrispondenza delle aperture; la riduzione delle dimensioni delle aperture; la schermatura solare delle aperture.

Paramenti murari spessi, caratteristiche tipologie abitative (a corte e a patio) e specifiche forme di copertura, sono alcune soluzioni per

a. Giardino attraversato al centro da un canale d'acqua che si ricongiunge alla Sala della Fontana. Palazzo della Zisa, Palermo.

Fonte: Immagine dell'autrice E. Nicolini

b. Sala della fontana con salsabil inclinato a parete. Palazzo della Zisa, Palermo.

Fonte: Immagine dell'autrice E. Nicolini

ridurre le oscillazioni termiche all'interno degli edifici dovute all'irraggiamento e per approssimare la temperatura interna alla media giornaliera della temperatura esterna. La copertura a cupola o a volta, ad esempio, si configura anch'esso un sistema di protezione solare in quanto esposta ad irraggiamento solare zenitale, riduce sensibilmente la temperatura della superficie unitaria irradiata [30] e pertanto, in grado di assicurare prestazioni di isolamento termico superiori ai più usuali tetti piani. Inoltre, rispetto alla copertura a falda o piana, la forma a cupola aumenta la capacità di dispersione termica nelle ore notturne del calore accumulato per irraggiamento e, inoltre, consente di raccogliere l'aria più calda in alto, lasciando più freschi gli strati inferiori. La copertura a falda, diffusa ancor prima dei tetti a cupola, era un'alternativa valida alla mitigazione dell'irraggiamento in quanto il sole batteva prevalentemente su una delle due falde.

A creare l'effetto di raffrescamento degli ambienti interni contribuisce anche la scelta dei materiali di costruzione ad elevata inerzia termica e di rivestimento delle superfici che divengono riflettenti o assorbenti: l'utilizzo di colori chiari delle facciate, ad esempio, consente una buona riflessione della radiazione solare. Nelle regioni mediorientali europee dove l'esigenza primaria è la protezione dal sole si osservano diverse strategie come soluzioni di controllo dell'irraggiamento: a partire dalla scelta dell'orientamento degli ambienti a quella dell'uso di tipologie edilizie compatte a patio e a corte con presenza di spazi porticati [26].

Per schermare la radiazione solare le apertu-

re erano in genere prive di vetri e di dimensioni ridotte ed erano inoltre protette da corposi scuri in legno che oltre a schermare la luce solare avevano la funzione di isolamento termico notturno e nella stagione invernale. In alcuni casi le aperture svolgevano la sola funzione di ventilazione degli ambienti interni e, con l'ausilio di schermature era possibile esercitare una regolazione della temperatura variando il flusso di luce entrante dalle forature. Così, le aperture erano protette da imposte a graticcio o persiane realizzate con materiali leggeri (ad esempio listelli di legno di provenienza locale). Nei paesi meridionali, ad esempio, dal XVIII secolo i pesanti scuri sono stati sostituiti da persiane in legno, utili principalmente a graduare l'intensità della luce solare all'interno degli ambienti.

Un altro esempio sono le c.d. *clastrum* e *mashrabiya*, tipiche schermature solari diffuse nelle regioni del mondo islamico. La *mashrabiya* è una schermatura in legno intagliato che viene applicato sulle aperture delle facciate ed è composto da piccole balaustre in serie a formare decorazioni di tipo geometrico [31]. La *mashrabiya* oltre a regolare il soleggiamento degli ambienti interni, limitando il passaggio della luce, e essendo costruita in legno, è uno strumento di regolazione igrometrica, rilasciando o assorbendo l'umidità. Il *clastrum* è invece realizzato con mattoni di terra cruda disposti secondo disegni geometrici ed è posto su grandi aperture complanarmente alla superficie del paramento murario [4].

Soluzioni per la schermatura solare erano adottate anche a scala urbana. Il disegno planimetrico di molte città tradizionali è caratteriz-

zato dalla presenza di strade strette e tortuose e di ampie corti scoperte con giardini interni. La ridotta dimensione delle strade serviva a ridurre la superficie della facciata esposta agli scambi termici con l'aria esterna eccessivamente calda. Elemento ricorrente era la copertura delle strade, anche con solai ponte che creavano zone d'ombra. L'alternanza di zone in ombra più fresche e slarghi illuminati che fungevano da pozzi di ventilazione generava moti convettivi d'aria fresca: quest'ultima circolava fresca tra gli stretti vicoli e all'incontro con le zone più larghe si creava una differenza di pressione che portava l'aria più calda verso l'alto. In aggiunta, colori chiari nelle murature esterne allontanavano una parte della radiazione solare incidente, particolarmente verso la direzione sud, contribuendo a proteggere ulteriormente gli ambienti interni dal surriscaldamento. In alcune costruzioni che presentavano la facciata in pietra a vista, gli stipiti di porte e finestre venivano comunque dipinti di bianco per sfruttare il medesimo principio di riflessione della

radiazione solare. Anche nei contesti con climi freddi si sceglieva una struttura urbana compatta, senza però intervalli che davano origine a dispersioni d'aria, in quanto l'idea era quella di concentrare il calore generato al livello del suolo.

1.2 Adattamento climatico degli edifici storici

1.2.1 Tipologie abitative nell'antichità

Fino all'età preindustriale, gli edifici, privi di un sistema impiantistico, si adattavano al clima ed erano progettati in funzione dell'esposizione ai venti e al sole e al controllo dell'irraggiamento solare, offrendo ombra in estate e sole in inverno [32]. Dall'antica Grecia pervengono i primi scritti di un'abitazione ideale che ben si adatti al clima Mediterraneo.

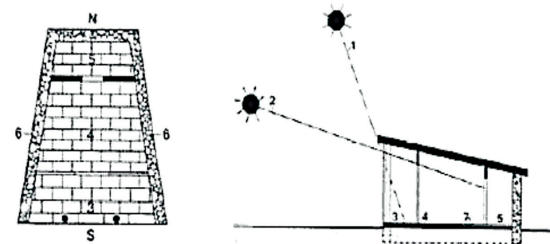
Lo storico greco Senofonte (430-355 a.C.) riporta nel suo libro "Memorabilia" un discorso che avrebbe fatto a Socrate, dove descrive i

a. Casa ideale di Socrate secondo la descrizione nelle Memorabilia di Senofonte. Leggenda: 1) Inclinazione dei raggi solari durante il periodo estivo; 2) Inclinazione dei raggi solari durante il periodo invernale; 3) Portico, terrazza; 4) Stanza principale; 5) Ripostiglio; 6) Muri massicci (accumulatori di calore); 7) Pavimento di pietra (accumulatore di calore).

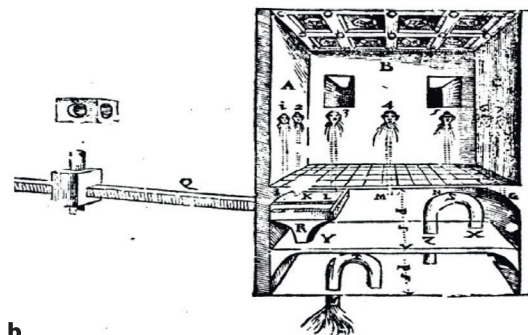
Fonte: <http://architetturaclimatica.blogspot.com>

b. Illustrazione del raffrescamento ventilativo ipotizzato da Erone d' Alessandria.

Fonte: Alexandrinus, H., Aleotti, G. B., 1647 [35]



a



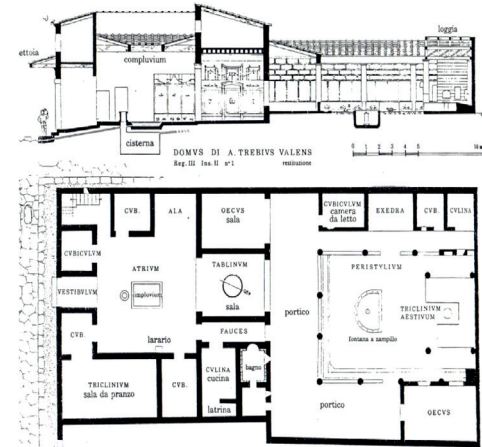
b

a. Peristilio della Domus dei Dioscuri di Pompei
Fonte: <https://www.romanoimpero.com>



a

b. Pianta e sezione di domus romana.
Fonte: Bearzi, G., & Bearzi, V., 1997 [37].



b

caratteri dell'abitazione ideale e nel libro "L'economico" ne descrive tutti i particolari. Nel testo viene precisata la necessità di considerare l'esposizione degli ambienti giorno a sud, affinché, in inverno, il sole possa penetrare in profondità ed essere facilmente escluso in estate [33]. Le caratteristiche dell'abitazione ideale, così descritta da Senofonte sono in buona parte riscontrate nelle prime colonie fondate dai Greci nell'VIII secolo a.C.

Il primo sistema di raffrescamento per ventilazione progettato è, infatti, ascrivibile all'antica Grecia in riferimento a quanto descritto da Erone di Alessandria, matematico e ingegnere del I secolo d.C., nel suo trattato di "Pneumatica", tradotto in età rinascimentale dall'architetto Giambattista Aleotti, che illustra un meccanismo di ventilazione concepito collegando i piani interrati con gli ambienti al piano terra attraverso delle bocche mascherate da elementi scultorei [34].

La letteratura archeologica individua le ti-

pologie di abitazioni a pastas e a prosta: con cortile e porticato. Le prime, tipiche dell'antica città di Olinto (430 a.C.) nella Calcide, si articolavano attorno ad un cortile e su uno o più lati di questo si estendeva un loggiato o porticato, zona ventilata, aperta su un lato, che riparava dal sole e dalla pioggia. La seconda, caratteristica per la città di Priene in Asia Minore, riunisce due elementi architettonici: il megaron (veranda coperta) e il cortile [35].

Il cortile e il megaron protetti da un porticato e, in genere, prospicienti un giardino sono, anche, elementi architettonici tipici delle domus romane, sfruttando il principio che in inverno l'inclinazione dei raggi del sole faceva sì che l'irradiazione solare riscaldasse l'intero ambiente interno oltre la veranda o il porticato e in estate, per via dell'alta posizione del sole, la copertura dei due elementi conferiva ombra. Nella domus romana sono riscontrabili i principi costruttivi indicati da Vitruvio nei dieci libri del De architettura (I sec a.C) e in relazione al



a



b

comfort degli ambienti interni, si legge che le abitazioni sono progettate in rapporto alle condizioni climatiche locali e che, quindi, differiscono in funzione se siano situate nelle regioni settentrionali o meridionali [36]. Il peristilio negli edifici di epoca romana ha la funzione di protezione dall'irraggiamento eccessivo e allo stesso tempo è una zona adornata di elementi che contribuiscono ad aumentare il senso di fresco. Un esempio è la Domus dei Dioscuri di Pompei, nel quale era sfruttato il principio dell'evaporazione derivante dalla vegetazione, piccoli orti e una fontana al centro del peristilio [37].

Tra le tipologie abitative romane la villa è il luogo dove sono maggiormente riscontrabili le soluzioni utili al benessere indoor. Tra i molteplici esempi si ricordano la villa di Plinio il Giovane (61-114 d.C.) in Etruria e la villa di Val Tiberina nei pressi dell'odierna Città di Castello, entrambe dotate di porticato, peristilio e spazi orientati in stretto rapporto al sole e al

clima [38]. La villa di Val Tiberina presenta, inoltre, una galleria in pendenza (cryptoporticus) voltata a botte che mette in comunicazione la villa con un gruppo di fabbricati destinati alla sola residenza estiva.

Il Criptoportico lo si ritrova in diverse ville nell'Italia centrale (I sec. a.C e I sec. d.C.) in parte o del tutto interrato, con piccole aperture e lucernari in modo da mantenere un ambiente ermetico alla calura esterna. Anche i ninfei di origine greca, si diffusero in età romana nelle ville; questi erano caratterizzati dalla presenza di acqua e dalla penombra.

Elementi architettonici della tradizione classica greco-romana, quali il megaron e i portici, si ritrovano anche nelle case a patio o a corte diffuse nell'architettura islamica. Il patio e la corte interna si differenziano per le proporzioni rispetto al volume dell'edificio, il primo ha una maggiore compattezza e sviluppo in altezza superiore alla corte; inoltre, la morfologia del

a. Kairouan, Tunisia, vista del tessuto urbano con gli edifici organizzati intorno alle corti centrali.
Fonte: Moretti, G., 2007 [5].

b. Takhtabùsh nell'abitazione Beit as-Suhaymi (1796) al Cairo
Fonte: <https://www.cairoptours.com>

patio consente di ricreare un effetto camino con aspirazione di aria calda dall'interno degli ambienti e rilascio di aria fresca stratificata in basso. Le tipologie più diffuse di abitazione a corte nelle regioni islamiche sono quella con il takhtabùsh e quella con il maqa'ad. Il takhtabùsh è una loggia esterna coperta leggermente rialzata rispetto al piano di posa dell'edificato principale e collocata tra un cortile e un giardino, con quale confina tramite una mashrabiya [32]. Le differenti volumetrie all'interno del sistema cortile-loggia-giardino attiva un moto convettivo d'aria fresca. Il maqa'ad è una loggia collocata al primo piano e aperta verso la corte che orientata a nord, captando le brezze più fresche e non subendo irraggiamento diretto [5].

1.2.2. Esempi di tecnologie storiche per il controllo climatico

L'architettura del passato presenta elementi costruttivi interessanti dal punto di vista del controllo climatico e un ruolo fondamentale è svolto dalle tecniche costruttive risultato di una secolare cultura delle maestranze locali [39]. Cultura rintracciabile, in prima linea nei paramenti murari che sfruttano al massimo le potenzialità dei materiali da costruzione locali. Nelle costruzioni tradizionali delle aree a clima caldo secco è comune l'utilizzo di muraure di elevato spessore, con una grande inerzia termica e capacità di traspirazione (blocchi di roccia, mattoni cotti o crudi). Diffuso nella tradizione islamica poiché genera una percezione di raffrescamento, è il marmo, materiale al tatto freddo utilizzato frequente-

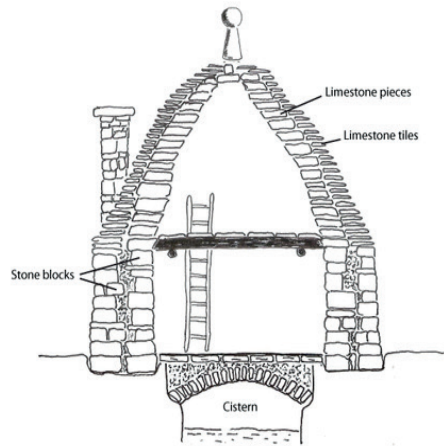
mente per rivestire pareti e pavimenti e vasche d'acqua [1].

Nei climi aridi dell'area mediterranea nordafricana e mediorientale, gli archetipi spontanei più rappresentativi si integrano con il luogo adattandosi al suolo, in un continuo rapporto dialettico tra natura e artificio. L'uso di materiali semplici locali (terra cruda, canne, paglia) si combinano con tecniche di controllo della ventilazione naturale, di captazione delle acque, di inspessimento dell'involucro e di schermature solari.

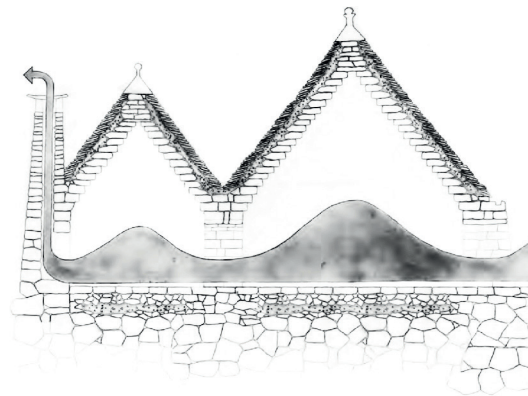
L'area mediterranea, caratterizzata da un clima temperato, nutre numerosi esempi di architettura del passato come modelli di controllo climatico, in grado di mantenere una temperatura confortevole dell'ambiente indoor in qualunque periodo dell'anno. Alcuni esempi sono i Dammusi isolani in Sicilia, i Trulli pugliesi e i Sassi di Matera, in Basilicata.

Il Dammuso, tra i più conosciuti quello dell'isola di Pantelleria, è un edificio con copertura voltata che richiama in parte il modello delle quba o dei marabutti maghrebini: edifici isolati di forma cubica e copertura a cupola [40]. La copertura è in pietra coperta da uno strato di terra, su cui viene steso un impasto di pomice vulcanica che ne enfatizza la prestazione coibente e, infine, uno strato di tufo rosso e latte di calce, come impermeabilizzante. La conformazione della copertura è funzionale a convogliare l'acqua piovana verso una cisterna sotterranea situata al di sotto della costruzione.

La prestazione isolante dell'involucro, data dalla rilevante massa muraria realizzata con pietra lavica posta in opera con la tecnica co-



a



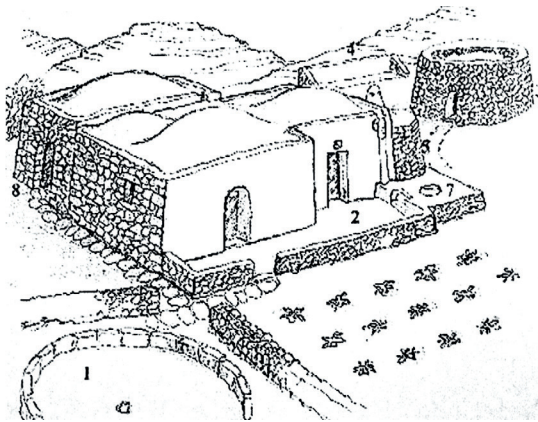
b

a. Sezione di un trullo con cisterna.

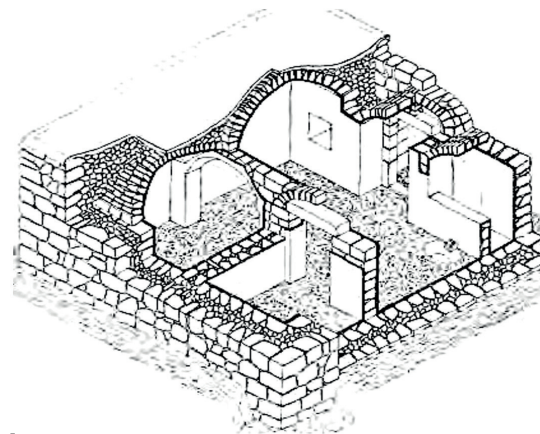
Fonte: <http://www.progettoenergiazero.com>

b. Sezione di un trullo doppio con camino di ventilazione.

Fonte: <http://www.studioarchitetturaabp.it>



a



b

a. Vista assometrica di un Dammuso di Pantelleria con recinto che ospita gli alberi come barriera al vento (1) e cisterna (7).
Fonte: Brignone F., 2001 [42].

b. Sezione assometrica di un Dammuso di Pantelleria.
Fonte: De Giovanni G., 1998 [41].

struttiva a secco, garantisce una temperatura ideale in contrapposizione al caldo d'estate e al freddo dell'inverno. La pietra lavica era ricavata dalla bonifica dei terreni per la formazione dei terrazzamenti che servivano in passato per facilitare le pratiche agricole su terreni collinari e scoscesi. Altri accorgimenti erano relativi

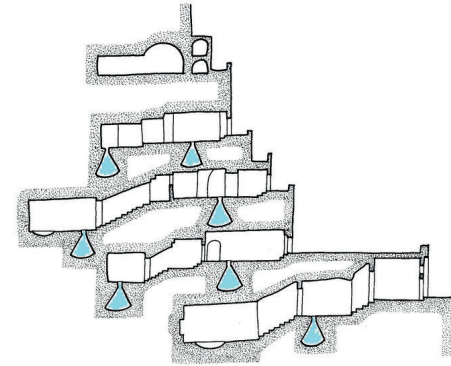
alla protezione dal vento: aperture disposte in un'unica direzione non ventosa e una costruzione circolare in prossimità dell'edificio che delimitava alberi da frutto disposti in maniera da costituire una barriera al vento [41]. Spesso anche l'assestamento a secco delle spesse muraure contribuiva alla traspirazione.

a. Vista d'insieme del Sasso Caveoso di Matera.
Fonte: <https://www.isas-sidimatera.com>



a

b. Ipogei sovrapposti, Sassi di Matera
Fonte: Laureano P., 1993 [44].



b

Sono diversi gli aspetti che accomunano i Dammusi ai Trulli pugliesi nella finalità di garantire il comfort indoor: in primo luogo il considerevole spessore del paramento murario costruito con pietra locale, ricavata dallo scavo; in secondo luogo, la valorizzazione della acqua piovana sia come risorsa idrica che, come fonte di raffrescamento, posta al di sotto dell'ambiente di vita, effetto, nel caso del trullo, enfatizzato dal focarile. Quest'ultimo è un condotto che collega l'ambiente interno con la cisterna captando l'aria fresca che lambisce l'acqua raccolta. La particolare tipologia costruttiva del trullo con la copertura a tholos con forma a volume conico è utile all'esterno per generare moti convettivi in prossimità e a far accumulare e non disperdere l'aria calda in sommità dell'ambiente interno; aria che poi fuori esce da un camino, in genere, posto sulla falda inclinata [42].

Il più famoso esempio di architettura rupestre in Italia è rappresentato dai Sassi di Matera, in Basilicata, un insediamento sviluppatosi in epoca preistorica ed evolutosi nel tempo, fino a

diventare un vero e proprio complesso urbano semi-ipogeo, dove le varie unità abitative si sviluppano nella profondità della roccia al fine di proteggere l'ambiente interno dall'irraggiamento. I Sassi di Matera sono costruiti in grotte naturali o cavità ipogee artificiali con fronti e, in pochi casi, volumi esterni edificati in pietra calcarea [43]. Si compenetrano con la natura, generando una trama urbana complessa a gradoni e lo scambio termo-igrometrico con il terreno stabilizza una temperatura indoor ideale per il benessere degli abitanti. Anche in questo caso è usuale ritrovare una cisterna sotto il primo solaio, che raccoglie l'acqua piovana e condensa l'umidità. Gli alvei scavati nella roccia riparano l'ambiente interno dai raggi del sole estivo.

L'analisi dei manufatti edilizi esistenti mostra come gli antichi saperi costruttivi possano produrre architetture solide e durevoli nel tempo e adatte al clima caldo estivo grazie alla forte inerzia termica del sistema massivo in pietra. Un elemento costruttivo interessante dal punto

di vista del controllo climatico è la volta “realina”. Tra gli esempi è rilevante la tipologia osservabile nel territorio trapanese che si compone da un doppio strato, uno voltato e uno piano, entrambi in pietra calcarea. Questo tipo di volta, espressione di una tecnica costruttiva sedimentata e assestata nei secoli, era utilizzata per lo più in copertura, ottenendo un’intercapedine utile alla mitigazione delle temperature nei climi caldo-umidi. L’intradosso era realizzato con masselli di calcarenite disposti in chiave e legati con malta di calce; l’estradosso era costituito da masselli di dimensioni maggiori posizionati in spessore e sostenuti da ulteriori masselli angolari disposti in verticale. Su questi si stendeva un massetto a base di calce e frantumi di calcarenite e uno strato di malta di calce su cui veniva sistemata la pavimentazione, generalmente in pastina di cemento. Gli elementi di calcarenite erano preferibili rispetto al tavolato in legno o all’incannucciato, in primis per la disponibilità del materiale nel luogo di costruzione ed inoltre, grazie ad una migliore risposta ai carichi e ad un’ottima capacità coibente [44].

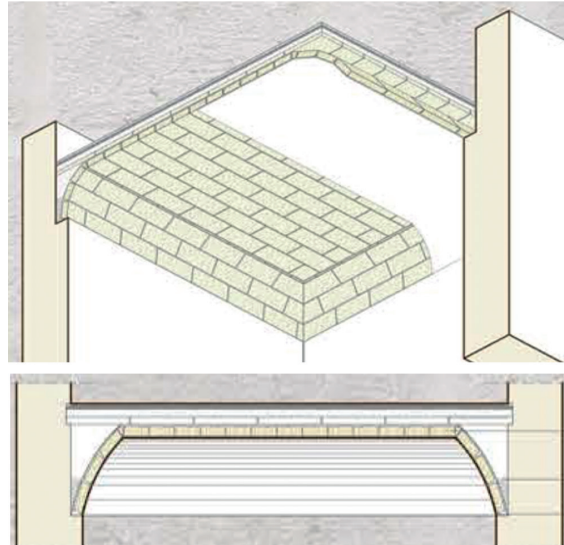
Dal punto di vista funzionale in termini di comfort indoor, sistema simile è il controsoffitto piano o voltato che, nel passato, ha costituito una soluzione ideale sia all’isolamento termico che acustico limitando anche il riverbero interno degli ambienti, dovuto principalmente alla notevole altezza di interpiano. Il controsoffitto piano era realizzato con stuoie di canne irrigidite da listelli di legno. Il controsoffitto voltato, soluzione nota già in epoca romana, è rinvenuto in maniera diffusa tra gli edifici di epoca settecentesca, arricchito all’intradosso da de-

corazioni in stucco o in gesso, per abbellire gli spazi interni di chiese e palazzi gentilizi. I materiali e le tecniche costruttive variano in funzione dell’epoca di costruzione, della geometria e delle località [45]. Generalmente la finta volta si componeva di un’orditura primaria con centine lignee, una secondaria e perpendicolare alla prima con listelli o tavole di legno alle quali era chiodato uno strato di incannucciato, traspirante e coibente, in stuoie o fasci di canne legate con spaghi o sottili corde in canapa. L’applicazione di più strati di intonaco (a base di calce o gesso) creava una superficie intradossale uniforme. L’uso di materiali naturali come il legno, le canne e il gesso e riduceva il livello di umidità degli ambienti.

L’idea dell’intercapedine è ripetuta nei sottotetti e nell’involucro edilizio, in entrambi i casi associata a sistemi di ventilazione. Alcuni esempi più semplici generavano flussi d’aria mediante aperture localizzate in prossimità della copertura e bocche di areazione in corrispondenza del solaio del sottotetto. Altri sistemi più complessi organizzavano una ventilazione che attraversava l’intero edificio a partire dai locali seminterrati dai quali era captata l’aria fresca e incanalata in appositi condotti ricavati all’interno delle mura portanti o direttamente in piccole aperture nei solai intermedi, fino al raggiungimento di aperture in copertura [46]. La posa in opera a secco della copertura, in genere, con listelli e correntini, tavolato e tegole consentiva il passaggio d’aria tra i giunti, configurandola un elemento leggero e traspirante.

In alcuni casi i moti convettivi erano ricreati anche in intercapedini realizzate in corri-

a. Intercapedine ventilata in copertura, Chiesa Madre "San Cataldo" di Gagliano Castelferrato (Enna), XIV sec.
Fonte: Immagine dell'autrice E. Nicolini



a

b. Ipocausto di epoca romana rinvenuto negli ambienti "Terme" della Villa Romana del Casale di Piazza Armerina (Enna).
Fonte: Immagine dell'autrice E. Nicolini



b

spondenza del primo solaio, tecnica nota a partire dal I secolo a. C. dai romani, c.d. ipocausto, per mitigare la temperatura di ambienti non direttamente riscaldati dal focolare. La tecnica dell'ipocausto prevedeva la realizzazione di un pavimento rialzato su una serie di piccoli pilastri di mattoni (*pilae*) e di una serie di canalizzazioni in laterizio (*tubuli*) che correvano lungo intercapedini ricavate nelle murature, all'interno delle quali circolava il flusso d'aria calda prodotta da un focolare situato nei locali inferiori dell'edificio. Il calore, diffuso per irraggiamento dalle pareti, era in grado di riscaldare gli ambienti. L'ipocausto faceva ricorso all'effetto camino, principio secondo il quale l'aria calda tende a salire verso l'alto in velocità proporzionale alla differenza di temperatura. I moti convettivi generati dall'aria calda continuarono ad essere sfrutta-

ti nel corso dei secoli, mediante tecniche sempre più affinate.

Caratteristica dell'architettura tradizionale è l'inerzia termica dei paramenti murari: era noto che maggiore era l'inerzia, minore era la velocità con cui avveniva la dispersione della temperatura. Durante il giorno l'involucro edilizio assorbiva calore per poi rilasciato nelle ore più fredde in un arco di tempo variabile a seconda delle caratteristiche della struttura, mantenendo nell'ambiente una temperatura costante [47]. La capacità dell'involucro edilizio di conservazione del calore prodotto internamente la si riscontra in differenti contesti climatici, utilizzando materiali di provenienza locale con specifiche caratteristiche di isolamento termico. In alcuni casi il paramento era realizzato con un doppio involucro e intercapedine (muratura a sacco) il più delle volte riempita con materia-

**a**

le povere ma dalle elevate prestazioni coibenti. L'idea era quella di aumentare le proprietà isolanti pur mantenendo un limitato peso. Il materiale riempitivo era una malta a base di terra argillosa, talvolta addizionata con calce di scarsa qualità o mischiata a paglia e cenere e costituiva il legante di una muratura di considerevole spessore, in cui teneva insieme pietrame grossolanamente sbizzato di varia pezzatura [48].

L'impiego di intonaci, che nel passato erano sempre di origine naturale e con elevate caratteristiche di macroporosità, incrementava la prestazione isolante dell'involucro edilizio. Si osservano esempi sin dall'antichità il cui impasto poteva essere costituito da limo misto a paglia sminuzzata con cui veniva realizzato lo strato grezzo e sul quale si procedeva a stendere successivamente uno strato di finitura costituito da gesso e calcare macinato a soluzioni nel corso degli anni più raffina-

**b**

te tra le quali l'uso di calce e polvere di laterizio (cocciopesto). Il cocciopesto è un inerte utilizzato fin dall'antichità per la preparazione di malte (c.d. malte composte), soprattutto nelle zone lontane dai giacimenti di pozzolana naturale. Le malte con cocciopesto furono utilizzate in epoca romana come impermeabilizzante e nel corso della storia sono state comunemente usate poiché il cocciopesto conferisce all'impasto a base di grassello di calce la capacità di far presa a contatto con l'acqua [49]. Prima della diffusione dei cementi, le malte idrauliche composte sono state adoperate per realizzare opere in ambienti umidi, anche subacquei, serbatoi, condutture d'acqua. Altre caratteristiche del cocciopesto, quali l'alta permeabilità al vapore e isolamento termico, favorivano la regolazione igrometrica degli ambienti, rendendolo un prodotto particolarmente indicato per la salubrità degli ambienti interni.

a. Volta realina con doppio involucro
Fonte: Mami, A. et. al., 2022 [44]

b. Stratigrafia e imposta della volta realina
Fonte: Mami, A. et. al., 2022 [44]

a. Dettaglio di muratura a sacco con terra e pietrame sbozzato.

Fonte: Germanà, M.L., 2011 [48]

b. Anrico intonaco di cocchiopesto

Fonte: <https://www.quaderniquarneti.it/>



a



b

1.2.3 Elementi bioclimatici nei trattati

La riscoperta dei testi antichi, con particolare riferimento al *De Architectura* di Vitruvio, orienta gli artisti rinascimentali a riconsiderare le tecnologie per il comfort indoor adottate nell'età classica. I fondamenti sull'orientamento degli ambienti e la relazione con il luogo, che assicurano una minore dispersione termica dello spazio interno, nonché l'importanza di distinzione delle residenze per le diverse stagioni, sono rimarcati da Leon Battista Alberti nel *De re Aedificatoria* (1452). Leon Battista Alberti descrive anche l'utilizzo di portici e cortili dei quali vengono sottolineati, oltre alla capacità di mitigazione degli effetti atmosferici, gli aspetti strutturali e di recupero delle acque. L'interesse per le soluzioni storiche dell'età classica è evidente anche nella scelta compositiva volumetrica dell'edificio in relazione ai principi di proporzione e simmetria intorno ad un ambien-

te centrale. Un esempio è Villa Madama a Roma, dove, anche se mai completata, secondo le intenzioni iniziali del progetto di Raffaello sono proposte soluzioni finalizzate alla captazione dei venti dominanti e alla schermatura solare mediante uno studio approfondito sull'orientamento delle aperture.

Leon Battista Alberti dedica una parte del suo trattato al suo contemporaneo architetto Filippo Brunelleschi progettista, tra le tante opere, di Palazzo Pitti a Firenze (1458). Il tipo di aria condizionata progettato a Palazzo Pitti è un'applicazione tecnologica possibile per la presenza di un parco adiacente l'edificio: l'aria fresca proveniente dal giardino di Boboli, situata alle spalle del palazzo, viene incanalata con un sistema di dislivelli della pavimentazione verso una stanza del seminterrato del palazzo dotata di apposite bocchette di ricezione; da tale ambiente l'aria viene distribuita in rete nelle

stanze sovrastanti che appartenevano al quartiere residenziale dei Medici [17]. A potenziare la capacità di raffreddamento del sistema è un originale impiego delle acque fredde contenute nelle ghiacciaie del palazzo, utilizzate in modo da poter abbassare la temperatura e umidità dell'aria prima di entrare in circolo.

La soluzione di mettere in comunicazione ambienti sotterranei con i saloni dei palazzi, attraverso condotti dai quali affluiva l'aria fresca, trova applicazione in alcuni edifici dei secoli successivi, quali il seicentesco Palazzo Corsini a Firenze. L'edificio presenta un sistema di raffrescamento degli ambienti della zona estiva mediante moti convettivi provenienti da una ghiacciaia ipogea sulla sponda del fiume Arno. Il locale ipogeo è collegato agli ambienti soprastanti attraverso botole a pavimento chiuse con rosoni traforati di marmo. Sistemi simili a quello di Palazzo Corsini sono riscontrabili anche in edifici di grandi dimensioni, come il primo impianto realizzato da Jacob Perkins nel 1837 a Londra, per raffrescare il Parlamento inglese [50].

Il controllo del microclima indoor è espresso nei Quattro libri dell'Architettura (1570), trattato pubblicato dall'architetto Andrea Palladio. Nel primo dei quattro tomi è descritta la tecnologia dei covoli delle ville cinquecentesche di Costozza [51]. Allo stesso modo l'architetto Vincenzo Scamozzi, contemporaneo di A. Palladio e attivo nell'area veneta, nel libro terzo del suo trattato "L'idea dell'architettura universale" (1616) e successivamente, Francesco Milizia teorico del neoclassicismo, nel secondo volume del suo "Principi di architettura civile"

(1813), prendono nota dei ventidotti di Costozza che conducono vento fresco negli ambienti superiori.

Inspirandosi ai principi dell'età classica, sul tema del controllo microclimatico degli ambienti interni scrive il filosofo napoletano Giovan Battista Della Porta, uomo poliedrico che pubblica "I tre libri de Spiritali" (1606). Della Porta trae spunto dal trattato di Erone di Alessandria e nel suo terzo libro descrive l'organo idraulico visto in Tivoli, nel giardino dell'illustrissimo cardinal di Este e l'evoluto sistema di raffrescamento ottenuto mediante moti convettivi d'aria provenienti da locali interrati e ricchi d'acqua.

Anche Leonardo da Vinci si interessò ad alcune soluzioni di raffrescamento, annotando in alcuni suoi documenti come nel castello di S. Giorgio a Mantova vi fosse una ruota a pale che alimentava un grande mantice che prelevava l'aria fresca di un bacino d'acqua coperto e la inviava negli appartamenti della marchesa Isabella d'Este [52].

1.3 Il comfort indoor nell'architettura del Movimento Moderno

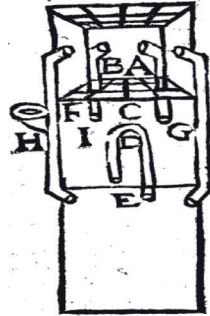
L'architettura del primo Novecento tentò di rifondare un modo di abitare più razionale. Le diverse correnti del Movimento Moderno hanno in comune l'approccio funzionalista, secondo il quale la forma degli edifici non deve derivare da necessità stilistiche, ma dalla rispondenza ai bisogni e alle attività degli individui. Come scrive l'architetto tedesco

a. Illustrazione del meccanismo di raffrescamento di Erone.

Fonte: G.B Della Porta, 1556 [50].

b. Bocche di areazione a pavimento della zona estiva del Palazzo Corsini a Firenze.

Fonte: <http://www.palazzocorsini.it/>



a

Sia la camera A B, e sotto quella sia un profundissimo pozzo G F, la cui bocca couerta G I, che non respiri, paffi per questo un'embortatore largo, & aperto H, faldato con esso, che riceua l'acqua da un canal grande, e quanto il canal farà più alto, e se con maggior uolenza precipiterà nell'embortatore, tato farà meglio, perche porterà feco maggior copia di uento, e maggior freddezza, dal pozzo uerranno canali nella camera, che ui portino il uento dentro, & fieno C A, F B. nel mezzo del pozzo fia un partimento, e sia bufato da un sifone, che quado il pozzo A F, farà pieno di acqua, per il sifone D E, farà calar giù l'acqua nel pozzo più di sotto, e per altri canali sia portato il uento cacciato nella camera, che per moltiplicati canali uèghi a moltiplicarsi il uento.



b

Bruno Taut in *Architettura Moderna* (1929) la prima esigenza in ogni edificio è il raggiungimento della migliore utilità possibile, la bellezza consiste nel rapporto diretto tra edificio e scopo [53].

Con l'avvento del cemento armato nell'architettura, la struttura è affidata al telaio strutturale portante con il vantaggio di sostituire materiali pesanti ed opachi per la realizzazione dell'involucro perimetrale con ampie vetrate. In tal modo si ottiene un grado di illuminazione più elevato e un'apertura completa dell'edificio verso il paesaggio che lo circonda. Vengono tuttavia a crearsi nuove problematiche legate principalmente al riscaldamento degli ambienti interni, dovute, in particolare, alla maggiore irradiazione che durante la stagione estiva genera un effetto serra. Un'altra questione è l'aumento della trasmittanza termica dei paramenti a favore di spessori ridotti fino alla potenziale assenza di inerzia termica che in

qualunque luogo e stagione genera un disagio per l'uomo e per la manutenzione dell'edificio.

Un altro aspetto delle strutture intelaiate è il ponte termico che si potrebbe generare a causa di una diversa densità di flusso termico di due elementi costruttivi adiacenti di diversa natura. Le zone più a rischio sono, in genere, tra gli elementi in calcestruzzo e la muratura che chiude il paramento, ma anche in corrispondenza di architravi, cordoli, ecc., soprattutto perché il calcestruzzo tende a disperdere il calore. Tale situazione può comportare la formazione di condensa e insieme all'instabilità termica globale dell'involucro produrre effetti negativi sulla salute dell'individuo.

Sono diversi gli architetti che già a partire dal periodo storico Funzionalista, si adoperano per individuare delle soluzioni tecniche che conferiscano un aspetto bioclimatico all'architettura, in particolare negli ambienti di vita e di lavoro. Le Corbusier fu un antesignano tra

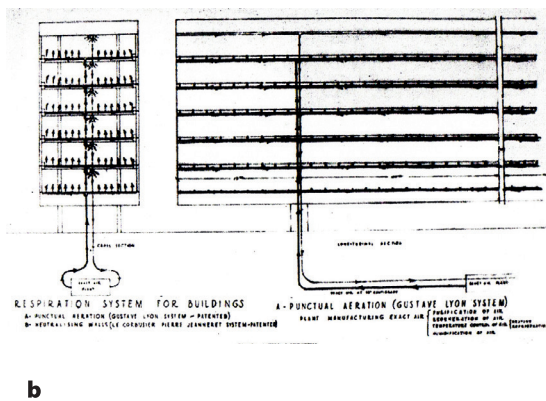
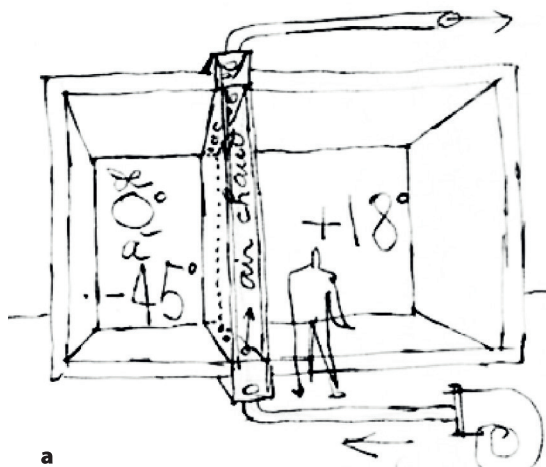
gli architetti del Movimento Moderno a definire una nuova visione di architettura in rapporto all'ambiente naturale, studiando i parametri ambientali che incidono nel benessere dell'ambiente interno.

Nella carta d'Atene (1933), da lui fortemente avallata, il riferimento al controllo climatico negli ambienti interni è chiaro: per ogni alloggio è stabilito un numero minimo di ore di insolazione ed è da evitare l'orientamento esclusivo a nord o la totale privazione dal sole a causa d'ombre portate [54]. Principi proposti nell'idea della Ville Radieuse (1924), progetto urbanistico non realizzato, che presentava la totale chiusura sul fronte nord con elementi massicci e forati con piccole feritoie in grado di generare ventilazione e un minimo di luce, nonché una distribuzione degli ambienti residenziali sul fronte opposto [55].

Le Corbusier introduce l'uso di sistemi di schermatura solare per le grandi chiusure ve-

trate e sviluppa strategie progettuali nate da modellazioni architettoniche che simulano l'irraggiamento. Nella Cité de Refuge a Parigi (1933) l'architetto esprime le sue idee in termini di alloggi sociali e di ricerca di un sistema di controllo climatico [56]. Il progetto prevedeva due impianti tecnologici mai realizzati: il mur neutralisant e la respiration exacte. Il primo è una parete con doppio vetro e un'intercapedine da 5 a 10 cm e in cui far circolare una corrente d'aria calda non respirabile e prodotta da un piccolo impianto termico. Il secondo consiste in un sistema meccanizzato di ricambio d'aria finalizzato a mantenerla salubre e a temperatura costante [57].

Nelle Maisons Jaoul Neuilly-sur-Seine (1956) abitazioni pensate per rendere confortevole la vita domestica, Le Corbusier decise di impiegare volte di copertura in tegole piatte a vista utili ad aumentare la superficie di calore disperdente [58]. Le Corbusier fu, inoltre, uno dei



a. Schema originario di Le Corbusier che descrive il sistema del mur neutralisant.

Fonte: Ramírez-Balas, C., Fernández-Nieto, E. D., et. Al., 2015 [56].

b. Schema originario di Le Corbusier che descrive il sistema di ventilazione respiration exacte.

Fonte: Ramírez-Balas, C., Fernández-Nieto, E. D., et. Al., 2015 [56].

a. Tetto-terrazza dell'Unité d'Habitation con camino di ventilazione.
Fonte: <https://www.archdaily.com.br>

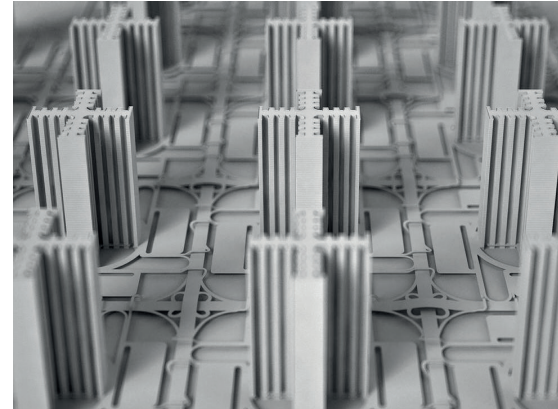
b. Modello della Ville Radieuse. La facciata dei grattacieli è caratterizzata da setti che vogliono schermare la luce.
Fonte: <https://www.deviantart.com/waskogm/art/Radiant-City>



a

primi architetti a proporre i *brise-soleil* in architettura, con l'obiettivo di limitare l'entrata diretta dei raggi solari all'interno degli ambienti, garantendo comunque un buon livello di illuminazione ma riducendo il surriscaldamento. Si riscontrano come setti in cemento armato integrati nella struttura stessa dell'edificio nelle opere realizzate del progetto Lotissement a Barcellona (1931) e nelle Unité d'Habitation a Marsiglia (1952), nel Palazzo dell'Assemblea a Chandigarh (1951).

L'architetto statunitense Frank Lloyd Wright volse la sua ricerca architettonica all'approfondimento del rapporto fra l'individuo e lo spazio architettonico e fra questo e la natura. Le sue architetture appaiono organiche, sono radicate al terreno in cui sorgono e realizzate con materiali naturali (legno, pietra, mattoni) ed è posta particolare attenzione ad un adeguato illuminamento degli ambienti interni. Fallingwater (1939), la casa in prossimità della cascata sul torrente nei boschi della Pennsylvania è la massima espressione della sua filosofia [59].

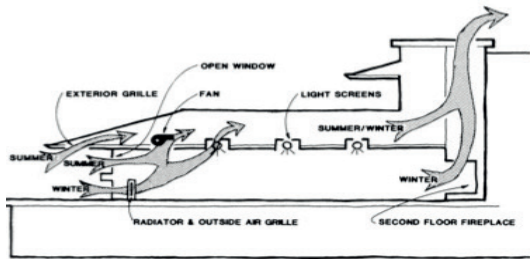


b

Il Larkin Building edificato a New York nel 1906 ma demolito nel 1950 sorgeva in un contesto industriale dove la qualità dell'aria era ai minimi livelli. L'architetto scelse, quindi, di isolare ermeticamente il volume dall'esterno, mediante uno spesso involucro in blocchi di laterizio, per proteggerlo dal rumore e dai fumi delle adiacenti fabbriche e tale da rispondere alle prestazioni di isolamento termico. L'edificio è un esempio significativo d'uso di un grande sistema con condotti a rete per la ventilazione e il condizionamento adatti ad assicurare il benessere interno al luogo di lavoro [60]. I numerosi condotti verticali e orizzontali attraversavano un'intercapedine nell'involucro e si integravano in vari elementi architettonici. La Robie House a Chicago (1910), architettura esemplare della Prairie School [61], stile che caratterizza architetture in stretta dialettica con il contesto esterno, è un'abitazione climatizzata che si sviluppa lungo l'asse est-ovest, con sporgenze del tetto calcolate a seconda degli orientamenti e dell'altezza zeni-

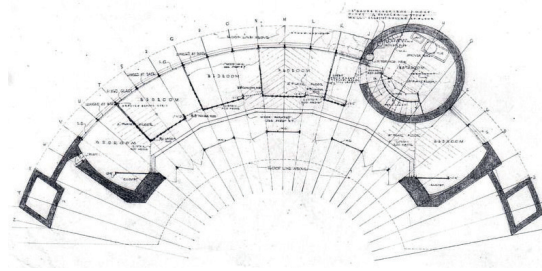


a



c

tale del sole per impedire il surriscaldamento dell'ambiente interno senza ridurre l'illuminazione invernale. A nord sono collocati il corpo dei servizi a costituire una barriera al freddo e un cortile quale serbatoio di aria fresca. Le zone giorno sono molto luminose anche per mitigare le basse temperature invernali. Un altro esempio è Villa Jacobs (1937), abitazione unifamiliare situata a Madison, denominata "emiciclo solare" per via della forma e



b



d

all'orientamento [62], la luce del sole può penetrare in inverno attraverso una parete vetrata sotto la quale vi è un bacino d'acqua, posto tra esterno e interno che umidifica l'aria. Presenta, inoltre, un riscaldamento a pavimento, soluzione rara per l'epoca.

L'architetto finlandese Alvar Aalto è tra i maestri del Movimento Moderno come colui che applicò i precetti del Funzionalismo secondo una visione indirizzata al benessere psicofisi-

a. Modello di Fallingwater esposto al MOMA Museum

Fonte: Frank Lloyd Wright Foundation / Artists Rights Society (ARS), New York, 2022

b. Disegno in pianta della Villa Jacobs con la disposizione degli ambienti interni progettata in funzione dell'emiciclo solare.

Fonte: Futagawa, Y. (Ed.), 1988 [62].

c. Disegno originale redatto da Frank Lloyd Wright che schematizza la ventilazione progettata per la Robie House.

Fonte: Estoque, J., 1987 [61].

d. Ricostruzione a colori da foto in bianco e nero del Larkin Building dove si notano le bocchette di uscita dell'aria attraverso i condotti di ventilazione in corrispondenza dei pilastri.

Fonte: Arch. David Romero

a. Auditorium della Biblioteca di Vipuri con controsoffitto ondulato in legno rosso.

Fonte: <http://architecture-history.org/>

b. Studio sul riverbero e lunghezza delle onde sonore all'Auditorium della Biblioteca di Vipuri.

Fonte: Aalto, A., Mattila, S. et. Al., 1927 [63].

c. Prospetto di Villa Mairea con rivestimenti in legno e Bow-windows orientate a est e ovest.

Fonte: https://it.wikipedia.org/wiki/Villa_Mairea

d. Studio del colore dei corridoi di degenza del Sanatorio di Paimio.

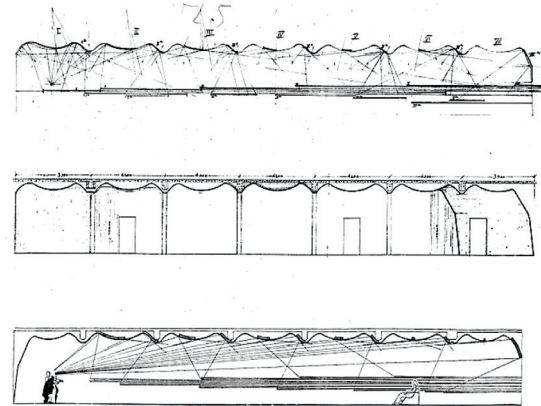
Fonte: <http://www.gianlucazoli.it/abitare/cura/>



a



c



b



d

sico dell'uomo. Nelle sue opere presta attenzione in modo particolare a soluzioni architettoniche che favoriscono il comfort visivo e acustico. Un primo esempio è Biblioteca di Viipuri (1935) caratterizzata da un attento studio della volumetria e dei particolari, tra i quali grandi oblò sulla copertura piana per un'ottimizzazione dell'acustica e dell'illuminazione diffusa [63].

Gli spazi interni delle sue architetture si caratterizzano di segni sinuosi con materiali naturali, soprattutto il legno del quale ne sfrutta

al massimo le qualità termoisolanti, strutturali e fonoassorbenti, tra gli esempi più conosciuti Villa Mairea a Noormarkku, Finlandia (1940), il Municipio di Säynätsalo (1951) e la Casa della cultura di Helsinki (1958).

Il Sanatorio di Paimio (1933) mostra soluzioni progettuali che valorizzano il paesaggio verde circostante e una possibile una ventilazione naturale degli ambienti [64]. Un rilevante studio sull'uso del colore sui soffitti e sulle pareti vuole esaltare il benessere psicologico dei

pazienti. Altre tra le principali misure sono il riscaldamento che proviene dall'intradosso del solaio superiore al fine di non avere un'irradiazione diretta del calore; la ricerca del giusto orientamento dei volumi e la disposizione degli spazi e delle aperture in relazione alla funzione di ogni ambiente.

1.4 Il comfort indoor nell'architettura contemporanea

Esempi di architetture in tutto il mondo e la costante attenzione della comunità scientifica verso le tecnologie per il comfort indoor negli edifici evidenziano un'attenzione sempre maggiore al progetto architettonico dell'abitare e della riqualificazione dei luoghi. Dal passato ritorna il concetto di ecologia, ossia le relazioni tra gli esseri viventi e l'ambiente in cui vivono, con particolare riferimento all'influenza che le variazioni climatiche esercitano sull'uomo.

L'edificio è un sistema in costante rapporto con l'uomo e l'ambiente in cui s'inserisce e il ruolo dell'architetto è centrale nel fornire le modalità abitative in relazione al contesto fisico e climatico con comfort abitativi elevati e bassi costi di realizzazione e manutenzione nel tempo. Ad essi va aggiunto il requisito diretto ad introdurre la risorsa energetica derivante da sorgenti naturali rinnovabili ed il requisito fondamentale dell'integrazione funzionale e linguistica tra le soluzioni tecnologiche per il comfort indoor e lo spazio abitativo.

Christian Schaller, l'artefice del rinnovamento urbano della città di Colonia in Germania,

come altri architetti contemporanei, evidenzia come l'architettura del passato fosse più ricca di potenzialità e risorse rispetto a quella contemporanea [65]. Grazie alla qualità di impatto ambientale contenuto che gli edifici antichi hanno, il risanamento eco-sostenibile dell'edilizia già realizzata sia che ne venga mantenuta la destinazione d'uso, sia che se ne converta l'utilizzo a nuovi obiettivi appare come una delle misure ecologicamente più significative. Nonostante questa consapevolezza, divenuta ormai patrimonio di molti e sia provato che le nuove costruzioni quand'anche a basso contenuto energetico concorrono nell'aumentare il fabbisogno totale dell'energia non cessa la spinta all'edificazione e quindi al consumo di suoli e paesaggi.

Dal passato si apprende che l'acqua, la vegetazione e la conformazione dell'ambiente edificato hanno un ruolo fondamentale sul comfort indoor, dal microclima interno di un edificio, influenzando sia il raffrescamento estivo che il riscaldamento invernale, alla qualità dell'aria, alle misure antiabbagliamento. Oggi la presenza vegetazione nelle coperture o nell'involucro edilizio e di bacini d'acqua, nonché il controllo della ventilazione naturale mediante facciate o coperture ventilate, camini di ventilazione e schermature solari sono le principali strategie per migliorare il comfort indoor.

1.4.1 Sistemi passivi di ventilazione

La ventilazione naturale indotta da una differenza di pressione è tra i sistemi più comuni dell'architettura contemporanea poiché nei

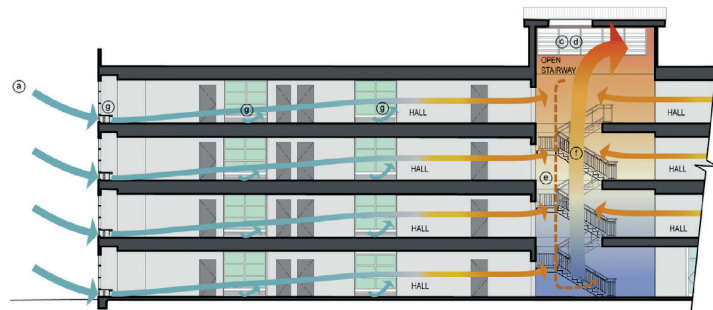
contesti urbani densi gli edifici fungono da barriera al vento e, quindi, è difficile poter sfruttare una forte pressione del vento. Potrebbe inoltre capitare che la distanza dalle aperture nell'involucro sia eccessiva o che la temperatura media dell'aria nel camino di ventilazione sia superiore a quella esterna.

Dato che la differenza di temperatura guida un flusso d'aria calda verso l'esterno questo tipo di ventilazione è significativamente influenzato dalla forma, posizione e dimensione delle aperture, ma anche dalle condizioni esterne. Altri elementi che potrebbero accelerare i moti convettivi sono la presenza di acqua che creerebbe uno spiccato divario di temperatura e la morfologia degli ambienti interni (elementi tronco-conici potrebbero generare un effetto Venturi dei moti convettivi); al contrario l'eventuale presenza di elementi divisorii rende impraticabile la ventilazione trasversale spinta dal vento. Tra le soluzioni attuali che sfruttano questa tipologia di ventilazione è ripreso dal passato il concetto di patio o cortile interno e quello delle torri o camini di ventilazione. In alcuni casi le aperture di fuoriuscita dell'aria sono integrate nel volume di un ambiente e sono poste sulla parte alta dell'involucro [66]. Per aperture si intendono finestre, fessure, griglie e feritoie controllabili, in cui la funzione di ventilazione è indipendente dalla funzione di illuminamento dell'ambiente interno.

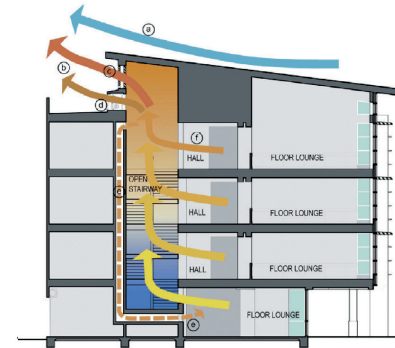
Recentemente riqualificato, il Tercero South Student Housing a Davis in California beneficia di una ventilazione naturale generata dalla diversa densità dell'aria causata dalla temperatura divergente [67]. L'aria calda galleggiante ar-

riva al soffitto, fornendo un flusso naturale alle aperture di scarico in cima al volume centrale della scala; l'aria fresca è aspirata dalle aperture inferiori e feritoie motorizzate posizionate in basso a sedili nel corridoio di ogni piano. Il sistema è controllato attraverso dei sensori che monitorano le temperature interne ed esterne, attivando feritoie e grandi ventilatori per innescare moti convettivi d'aria naturale in tutto l'edificio.

La ventilazione naturale può anche semplicemente essere indotta dal vento sfruttando le pressioni che s'instaurano al contatto tra il flusso d'aria e la superficie dell'involucro edilizio. Il vento induce una pressione positiva sulla faccia sopravvento e una negativa nella direzione opposta. La velocità dell'aria è molto importante per il raffrescamento dell'ambiente interno: se il corpo umano avverte un flusso d'aria più veloce si raffredda più rapidamente. Per incrementare la velocità d'aria all'interno degli edifici l'espedito è una ventilazione incrociata con un ingresso del flusso d'aria di dimensioni limitate e una più grande uscita opposta; dunque, è preferibile posizionare le aperture in lati opposti del paramento. Le differenze di pressione sulla finestratura causano vettori di superficie o correnti che si muovono lungo la superficie dell'edificio e sporgenze, feritoie e colonne possono alterare il modo in cui la brezza è incanalata, accelerandone o rallentandone il flusso; dove vi è un'apertura in un paramento semplice a superficie piana l'aria tenderà a muoversi direttamente attraverso l'apertura [68]. Nella progettazione architettonica in contesti climatici caldi umidi il ruolo della copertura è rile-

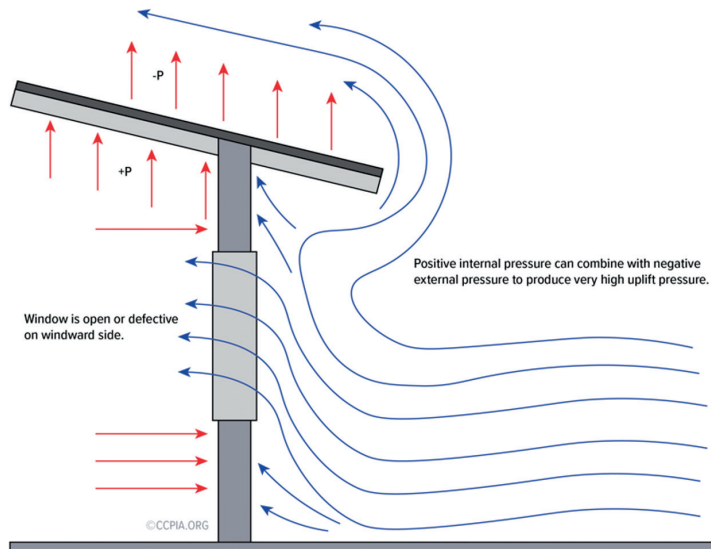


a

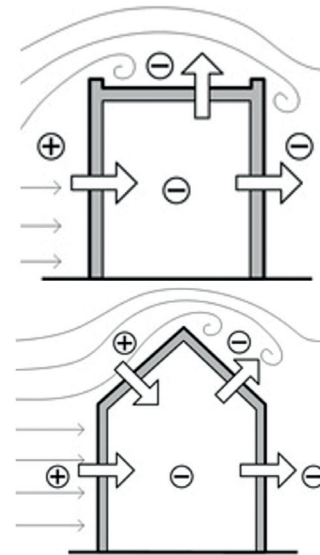


a. Sezione longitudinale e trasversale del Tercero South Student Housing a Davis in California. Legenda: a) aria entrante; b) pressione negativa indotta dalla forma della copertura; c) ventole di assistenza per la fuoriuscita dell'aria; d) feritoie motorizzate dove esce l'aria calda; e) aria bilanciata dal calore dei piani; f) aria stratificata naturalmente aspirata; g) presa d'aria sotto i sedili lungo i corridoi.

Fonte: <https://mogaveroarchitects.com/natural-ventilation-strategies-case-study-uc-davis-tercero-student-housing>



b



c

b. Azione della spinta del vento sull'involucro e sulla copertura di un edificio rappresentativo. Fonte: <https://ccpia.org>

c. Schema della pressione del vento su un edificio rappresentativo con copertura piana e a falda. Fonte: Straube, J., 2007 [66].

vante per diminuire la superficie su cui irradia il sole e, conseguentemente, ridurre i moti convettivi caldi.

1.4.2 Soluzioni integrate nell'involucro edilizio

Una tra le strategie passive per il comfort indoor, sulla quale oggi le aziende produttrici e i progettisti lavorano molto, è lo sviluppo di nuovi materiali e tecnologie per la realizzazione della stratigrafia dell'involucro edilizio in funzione delle condizioni climatiche del contesto.

Le chiusure opache dell'involucro edilizio ne determinano le prestazioni di inerzia termica e di isolamento acustico. L'inerzia termica di un componente edilizio è la capacità di trattenerne il calore e rilasciarlo in maniera lenta, attenuando le oscillazioni della temperatura dell'ambiente interno dovute ai carichi termici interni ed esterni variabili nell'arco della giornata [69]. Maggiore è la massa dell'elemento, maggiore è l'inerzia. L'inerzia termica dell'involucro edilizio consente un controllo delle condizioni termo-igrometriche dell'ambiente interno sia in estate che in inverno. Il controllo dell'inerzia termica può essere preventivato calcolando lo sfasamento termico e lo smorzamento termico dei singoli elementi, ovvero la loro capacità di ritardare e ridurre l'effetto di una sollecitazione termica.

Strutture continue in muratura o intelaiate ma con paramenti di chiusura ad elevata massa termica sono sistemi particolarmente efficienti: in estate, poiché l'energia del flusso termico esterno raggiunge la superficie interna solo dopo diverse ore, al culmine della giornata, nelle ore

più fresche e il calore può essere facilmente ridotto attraverso una ventilazione naturale; in inverno poiché evitano la dissipazione del calore dell'ambiente interno.

Sono diversi gli architetti contemporanei che hanno scelto un involucro pesante con una struttura massiccia tale da garantire un'elevata inerzia termica. Involucro di tale tipo sono, talvolta, accostati ad edifici storici con l'ausilio di materiali compatibili quale il laterizio [70]. L'intervento di riuso della Ex Chiesa di Sant'Ambrogio, a Cantù, dell'arch. M. Dezzi Barcodeschi ne è un esempio. Per il riuso della chiesa (come aula polivalente) e degli spazi che la contornano su tre lati sono stati aggiunti un vestibolo all'ingresso dalla piazza, il nuovo volume delle scale, ascensore e servizi sul retro. Tali volumi accessori sono racchiusi da una cortina in mattoni posati diagonalmente e sfalsati tra di loro a formare una texture in rilievo [71].

La soluzione adottata dagli architetti berlinesi Sauerbruch-Hutton per il WorkBrandhorst Museum (2008) a Monaco, Germania consiste in un paramento portante in cemento armato con un rivestimento esterno con listelli in cotto che compongono un gigantesco mosaico di lamelle verticali attentamente studiato per sfruttare ogni singola variazione di luce bavarese. Questo strato esterno si sovrappone ad una lamina metallica bicolore forata che ha funzione fonoassorbente nei confronti del rumore del traffico [72].

Diffusamente oggi posto in opera, in particolare, nelle ristrutturazioni di unità abitative, l'isolamento a cappotto è uno strato di isolante termico e, talvolta, anche fonoassorbente, che



a

viene steso sulla superficie esterna o interna (c.d. isolamento con controparete) dell'involucro edilizio [73]. Tra le due soluzioni, la stesura all'esterno elimina eventuali ponti termici. L'isolamento a cappotto ha una serie di vantaggi che volgono all'aumento della prestazione termogrometrica della parete sia nelle condizioni invernali che estive, riducendo il salto termico che essa subisce nell'alternarsi delle stagioni. Tuttavia, tale tipo di isolamento è inapplicabile nei casi di edifici storici o architettonicamente rilevanti e può essere di difficile applicazione nel caso in cui il paramento non sia uniforme e presenti numerosi elementi fuori piano, aggettanti. Un altro aspetto da osservare è la possibilità di formazione di condensa interstiziale, richiedendo l'uso di una barriera al vapore sulla faccia interna della parete.

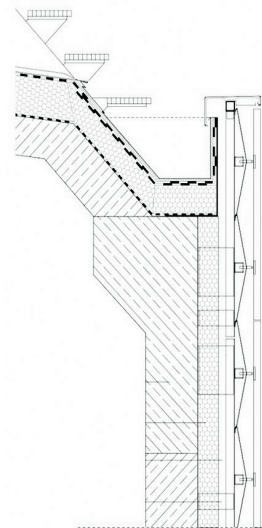
La successione di strati di materiali diversi



b

per realizzare involucri stratificati è anche questa una tecnica costruttiva ereditata ed evoluta dal passato. Sono diversi gli esempi di involucri che presentano un rivestimento con funzionalità decorative dell'ossatura muraria: si ricordi i rivestimenti con placche marmoree o laterizi a vista nell'architettura romana.

Riferendosi ancora all'architettura romana, si ricorda l'heliocaminus di origine vitruviana, un ipocausto delle aule termali (cavità nelle pareti) per lo sfruttamento diretto dei raggi solari [74]. Nel corso degli anni si è sperimentata la ventilazione di intercapedini d'aria nell'involucro edilizio che permetteva il raffrescamento passivo degli ambienti ed aveva anche funzione di drenaggio dell'umidità accumulatasi negli strati di muratura che le delimitavano. La presenza di intercapedini d'aria nell'involucro edilizio, infatti, ha da sempre protetto lo strato di



a. Museo delle arti popolari, Ex Chiesa di Sant'Ambrogio, Piazza Martiri di Belfiore, Cantù, Como. Dettaglio della tessitura in laterizio e serramenti. Fonte: Arch. M. Dezzi Bardeschi

b. Rivestimento con elementi in ceramica applicati su un paramento in cemento armato. Fase di cantiere e sezione tecnologica. <https://www.ceramicarchitectures.com/obras/brandhorst-museum/>



a

a. Schema della stratigrafia del sistema di isolamento sul paramento esterno con cappotto termico.

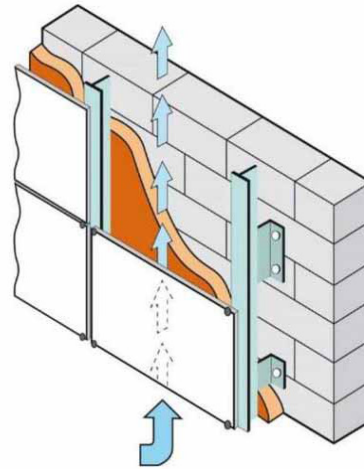
Fonte: <https://san-marco.com/accessori-per-sistemi-isolamento-termico-a-cappotto>

b. Schema della stratigrafia di una facciata ventilata con isolante.

Fonte: <https://www.in-fobuild.it/le-pareti-ventilate>

c. Intercapedine ventilata con rivestimento esterno in pietra distanziato dalla struttura portante.

Fonte: <https://www.pimarlimestone.com/pareti-ventilate>



b

muratura più interno da avverse condizioni climatiche, separandolo da quello esterno anche mediante altri strati di rivestimento opportunamente distanziati (tavole di legno o lastre di ardesia) [75]. Le pareti ventilate rappresentano oggi un sistema costruttivo diffuso che conferisce all'involucro buone prestazioni isolanti termiche e acustiche. Grazie ai progressi tecnologici, esistono molteplici sistemi costruttivi per facciate ventilate accomunati dal posizionamento di elementi modulari su un'apposita struttura di sostegno ancorata a distanza alla parete esterna.

Il sistema tradizionale di facciata ventilata prevede un'intercapedine realizzata all'interno del sistema murario e con o senza uno strato aggiuntivo di isolamento su una delle due superfici distanziate. Lo strato isolante permette di ridurre ancora di più la dispersione di calore; quindi, è da valutare in funzione del contesto climatico. La soluzione tradizionale potrebbe

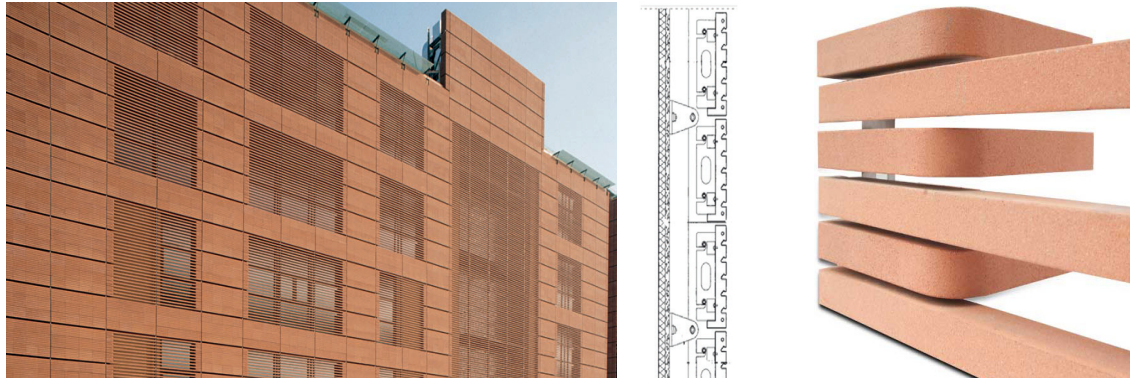


c

generare fenomeni di degrado delle pareti a causa della limitata traspirabilità. Per evitare tali problemi e per la dissipazione del calore accumulato nelle pareti esterne l'ideale è un sistema con elementi modulari lasciati aperti nella parte superiore e inferiore consentendo il passaggio di un flusso d'aria dal basso verso l'alto che favorisce la traspirabilità dei paramenti [76].

Lo strato esterno di una facciata ventilata può essere realizzato da pannelli, trasparenti (vetro, policarbonato) o opachi (pietra, ceramica, fibrocemento, nuovi materiali compositi ecc.); tra le innovazioni vi sono anche elementi fotovoltaici. Nel caso di involucro trasparente si può adottare una curtain wall ovvero una facciata continua vetrata connessa alla struttura portante; soluzione, generalmente, utilizzata nei paesi nordici che hanno la necessità di massimizzare l'apporto solare.

Le opere architettoniche di Renzo Piano si

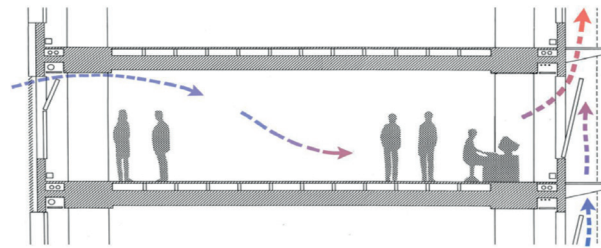


Edificio della Banca Popolare di Lodi. Prospetto, sezione della parete ventilata e dettaglio dei frangisole.

Fonte: <https://www.palagioengineering.com/>



a



b

a. Intercapedine ventilata a doppia parete vetrata. Sede della banca Intesa San Paolo a Torino. Fonte: <https://www.archweb.com/>

b. Intercapedine ventilata a doppia parete vetrata. Sede della banca Intesa San Paolo a Torino. Fonte: <https://www.archweb.com/>

caratterizzano spesso per l'uso di un doppio involucro ed in particolare, con rivestimento in laterizio; si ricordano gli interventi per le Expo a Genova (1992) e per l'Ircam a Parigi (1990), i progetti per un complesso residenziale a Parigi (1991) e per la Potsdamer Platz a Berlino (1999) [77]. Tra questi l'edificio realizzato per la Banca Popolare di Lodi (1999) presenta un particolare sistema di facciata ventilata. Un fronte omogeneo e compatto in cotto, che si piega e si curva è il rivestimento di un'intercapedine ventilata

di circa 20 cm [77]. Il rivestimento è assente in alcuni moduli situati nella parte superiore dell'edificio, in modo da rendere evidente la distinzione con la sottostante struttura portante in cemento armato e le mensole metalliche che lo sorreggono. L'impatto visivo dell'edificio si alleggerisce in alcuni punti mediante l'utilizzo di un sistema di griglie orizzontali frangisole con listelli in cotto trafileati a forma tubolare.

La facciata ventilata che l'architetto Renzo Piano ha progettato, invece, per la banca Intesa

San Paolo a Torino ha un involucro leggero totalmente trasparente. La facciata è costituita da una doppia parete vetrata e consente il passaggio dell'aria al fine di raffreddare un'intercapedine in corrispondenza del solaio e attivare moti convettivi naturali da convogliare all'interno. Il paramento più esterno è costituito da lamelle mobili, azionate localmente da pistoni [78]. La mobilità delle lamelle permette l'ingresso o la dispersione del calore per mezzo di un sistema centralizzato con sensori di temperatura che ne gestisce l'apertura e la chiusura. La facciata è, inoltre, protetta da un oscuramento auto-regolante in base alle condizioni d'irraggiamento. Durante la stagione estiva l'aria fresca notturna viene convogliata all'interno dell'intercapedine del solaio in cemento che ne assorbe la freschezza e lentamente la restituisce di giorno mediante pannelli radianti.

Gli studi Arup e Sauerbruch-Hutton hanno lavorato insieme alla realizzazione di un edificio per uffici a Berlino, il GSW Headquarters, conosciuto per il suo sistema di ventilazione naturale che parte dalla facciata. Una facciata a doppio strato e aperture sul paramento opposto generano una ventilazione incrociata: la facciata occidentale ha una seconda pelle di vetro che creando una pressione negativa ventila e raffredda l'edificio, la facciata opposta disperde l'aria calda. Una pensilina dalla forma aereodinamica posta sopra la copertura, in corrispondenza del punto di fuoriuscita dell'aria dall'intercapedine in facciata, simula un effetto Venturi, amplificando il moto convettivo. Gli ingegneri hanno studiato le prestazioni termiche e di ventilazione dell'edificio utilizzando un'a-

nalisi fluidodinamica che ha permesso di dimensionare le aperture di ventilazione e l'intervallo di temperatura ambientale, tenendo conto della massa termica dell'involucro. La parete esterna della facciata ventilata, inoltre, integra al suo interno un sistema mobile per la schermatura solare. L'edificio beneficia di un risparmio energetico fino al 40% rispetto ai progetti tradizionali [79].

1.4.3 Sistemi di protezione dalla radiazione solare

La temperatura superficiale dell'involucro edilizio condiziona quella dell'ambiente interno ed esterno. L'esposizione al sole è il fattore che influisce maggiormente sull'entità di scambio termico tra la superficie e l'ambiente interno, generando un effetto serra e tra la superficie e l'ambiente esterno, dando origine ad un'isola di calore nell'immediato intorno dell'edificio.

Il controllo della radiazione solare aiuta a ridurre l'apporto energetico dell'edificio, ancor più se si tratti di una schermatura mobile. Con un sistema di tale tipo, infatti, durante le giornate più fredde il sole penetrando all'interno degli ambienti li riscalda, durante quelle più calde la barriera al sole evita un irraggiamento diretto surriscaldante ma consente ugualmente il passaggio d'aria. Nel caso di una schermatura fissa è da valutare attentamente l'andamento giornaliero del sole per la specifica latitudine del luogo. La schermatura è più efficace in facciate esposte a sud-est e sud-ovest poiché durante tutto l'anno per la maggior parte delle ore del giorno il sole ha raggi quasi orizzontali, che

potrebbero penetrare profondamente all'interno degli ambienti [80]. Si possono ombreggiare sia superfici opache che trasparenti al fine di evitare fenomeni di abbagliamento connessi all'eccessivo contrasto di luminanza tra superfici riflettenti. Tra i sistemi regolabili per il controllo della luce naturale vi sono tende, veneziane e schermi installabili o all'interno o all'esterno o talvolta integrate nell'involucro edilizio.

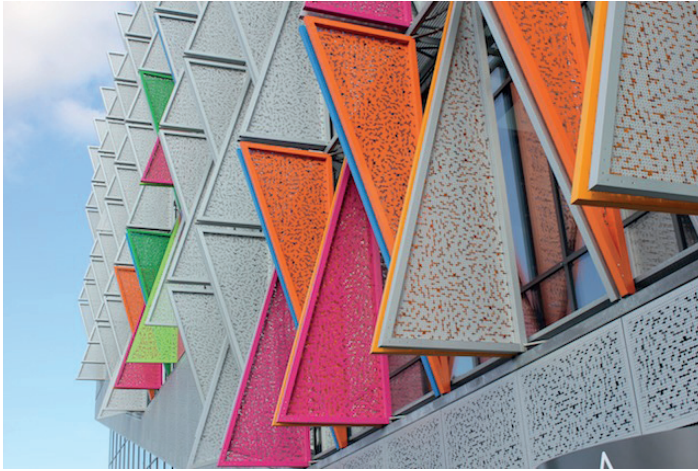
L'ombreggiamento può essere ottenuto, come più volte messo in pratica nella storia dell'architettura, progettando ampi aggetti, gronde o sporgenze in funzione dell'orientamento, immaginando il percorso zenitale del sole: linea immaginaria verticale che passa per il punto dove si trova l'osservatore fino a intersecare la sfera celeste. Inoltre, dall'architettura del passato, oggi è piuttosto ripresa l'idea di utilizzare la vegetazione come schermatura e conformare l'architettura al paesaggio naturale con particolare attenzione ad avvallamenti, insenature o sporgenze naturali che potrebbero fungere da protezione solare.

L'impiego di sistemi meccanici associati alla sensoristica oggi permette un uso delle schermature solari più attento al comfort indoor, regolandone l'apertura e la chiusura. È il caso, ad esempio, del Kolding Campus dell'Università danese, progettato dallo studio Henning Larsen Architects e realizzato nel 2014. È un edificio a basso consumo energetico che presenta una facciata dinamica che si autoregola in base alla luce e alla temperatura. La facciata continua in vetro si compone di 1600 pannelli brise-soleil in acciaio perforato montati su telai

mobili che ne consentono il movimento [81]. Durante il giorno la luce oltrepassa la foratura dei pannelli in modo lieve, di notte i led trasformano il palazzo in una scultura retro illuminata di vario colore. La schermatura solare, in questa occasione, oltre a costituire un sistema efficace per la regolazione del comfort visivo e termico indoor, è parte integrante del progetto di architettura e conferisce identità e valore all'involucro edilizio.

Un altro esempio di edificio che presenta un sistema di facciata con schermatura mobile è il Green Place, edificio per uffici, progettato da Goring & Straja per Stam Europe. Il complesso edilizio si presenta introverso, orientato verso la corte interna a cui si accede tramite un passaggio-galleria aperto sotto il corpo più basso. Lo studio compositivo delle facciate ruota attorno al principio di trasparenza determinato dal vetro, al quale si aggiunge il gioco di pieni e vuoti prodotto dal sistema di brise-soleil in bambù che riveste ampiamente i fronti sulla strada e in parte i fronti verso la corte [82]. I pannelli mobili schermanti hanno una struttura portante in acciaio zincato e verniciato sul quale sono fissate le canne di bambù di sezione circolare dal diametro di 5 cm che si infittiscono, si diradano e si regolano a seconda dell'esposizione solare.

Per ottenere il miglior livello di oscuramento, i frangisole si dividono inoltre in tre tipologie: quelli verticali orientabili sono dotati di un meccanismo che aziona il loro movimento; quelli verticali fissi (fronti esposti verso est) sono identici a quelli regolabili ma privi del sistema di movimentazione; quelli orizzontali fissi sono



a

a. Schermatura solare mobile del Kolding Campus, Danish University. Fonte: <https://www.casaeclima.com>

b. Facciata con schermatura solare con pannelli mobili in canne di bambù. Green Place, Business District Certosa, Milano. Fonte: <https://www.archilovers.com>



b



costituiti da pannelli lunghi 4 metri e presentano un supporto in acciaio alle estremità. La situazione di massima ombra, garantita dalla posizione ortogonale delle pale rispetto alla facciata, consta un oscuramento che raggiunge il 70% [83].

Le tecnologie odierne ci consentono di regolare il flusso di calore e luminoso entrante anche con l'uso del semplice vetro, senza elementi aggiuntivi. Qualche decennio fa le prestazioni dei vetri erano alterate variandone le tinte, aggiungendo allo stato fuso, sostanze coloranti come oro, argento, rame, oppure ossidi metallici che sciolti nel vetro gli impartivano il proprio colore.

Con il progredire della tecnica, si è optato per smaltature, rivestimenti e pellicole sulla superficie delle lastre o interposte tra le lastre.

Il vetro riflettente, quello selettivo e basso-emissivo sono realizzati con questa tecnica ed in particolare con un rivestimento di ossidi metallici che: nel primo caso conferisce una riflessione dell'irraggiamento visibile (luce) e dell'irraggia-

mento infrarosso (energia, calore); nel secondo e nel terzo caso è schermato soltanto l'irraggiamento infrarosso. Rispetto al solo vetro basso emissivo, la variante selettiva applica un'importante differenza strutturale: gli ossidi di metallo non vengono inseriti nella prima lastra, ma nella parte interna della seconda, più vicino all'ambiente esterno [84]. Lo scopo è quello di trattenere il calore interno nei periodi freddi.

Un'altra opzione è la diretta lavorazione della superficie della lastra con sabbiatura o con un processo di stampa serigrafica. Il vetro sabbiato viene decorato tramite un processo meccanico la cui lavorazione incide il vetro tramite un getto di sabbia a pressione. Il vetro serigrafato viene decorato attraverso l'utilizzo di un telaio sul quale viene realizzato il motivo da eseguire. I primi tessuti che fungevano da supporto per serigrafia erano di seta mentre oggi il materiale utilizzato per realizzare i telai serigrafici è il nylon. In en-

trambi i casi la lastra opacizzata diminuisce il flusso luminoso.

Quando la capacità schermante del vetro viene meno, le vetrate hanno comunque una funzione isolante termo-acustica associando più lastre contigue o separate da uno spazio riempito d'aria o gas (termocamera). La capacità isolante di questo tipo di vetri è determinata dallo spessore dell'intercapedine e dalla conducibilità termica del gas all'interno.

Tra i vetri stratificati schermanti vi sono quelli elettrocromici nei quali un elettrolita è inglobato tra due elettrodi a loro volta incorporati tra due conduttori trasparenti; il tutto è inserito tra due lastre di vetro. Quando viene applicata una tensione elettrica, avviene una reazione elettrochimica che causa la migrazione di ioni all'elettrodo e dall'elettrodo cromo genico, provocando una variazione del colore del componente [85]. Con tale sistema si può abbassare notevolmente la trasmissione luminosa ed infrarossa modulando la differenza di potenziale.

Anche i vetri fotocromatici variano il loro coefficiente di trasmissione in funzione dell'intensità della luce che li colpisce. Essi contengono alogenuri di argento e sono chiari prima dell'esposizione alla luce solare; poi, per azione di questa, le particelle di alogenuro danno origine all'argento metallico, che conferisce al vetro colorazione grigia e lo rende così un filtro per le radiazioni infrarosse [86]. L'uso di tali vetri, a fronte di un elevato costo di produzione, restituisce una prestazione efficiente perché, pur lasciando passare la luce, il calore radiante proveniente dagli interni in inverno viene riflesso all'interno, e la radiazione termica infrarossa del sole duran-

te l'estate è riflessa all'esterno; ne consegue un guadagno termico globale dell'edificio.

La schermatura solare con pannelli trasparenti vetrocamera basso emissivo caratterizzano la forma della facciata del Glass Building, sede della Saint Gobain Vetro Italia, a Milano, progettato dallo Studio CMR. Il lato ovest dell'edificio è ricoperto da pannelli di vetro stratificato e stampato collegati alla facciata esistente grazie ad una struttura in acciaio semi-indipendente che funge da percorso di manutenzione [87]. Al di là del loro valore estetico, le lastre di vetro influiscono sulla vivibilità dell'edificio in termini di irraggiamento solare e isolamento termico e acustico.

Altri sistemi di protezione dell'edificio dalla radiazione solare riguardano la conformazione della copertura e lo strato di finitura di essa. Nel primo caso, si tratta di aumentare la superficie disperdente, ad esempio con tetti a cupola o di diminuire la superficie irraggiata, ad esempio con una copertura a falda. Nel secondo il manto di copertura si completa con una stesura a base di calce bianca in grado di riflettere i raggi solari.

Oggi la questione si concentra più sui materiali di finitura estradossale del manto di copertura ed in particolare, sulla possibilità di riflettere la radiazione solare.

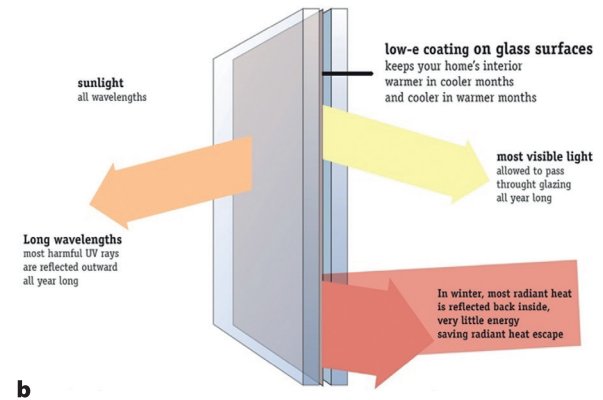
Una copertura di colore scuro (tetto caldo) potrebbe assorbire la radiazione solare raggiungendo temperature molto elevate con effetti negativi sul comfort indoor ma anche sulla durata dei manti. Il tetto caldo è una tipologia di tetto utilizzato principalmente per coperture piane, dove l'ultimo strato è rappresentato dalla guaina bituminosa. La guaina, posizionata nello strato più esterno, deve essere protetta a

a. Intercapedine ventilata a Glass Building, Milano
Fonte: <https://www.progettocmr.com>

b. Schema della capacità schermante di un vetro basso-emissivo.
Fonte: <https://www.ecohabitat.gr>



a



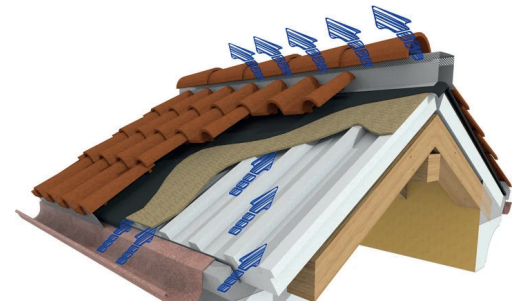
b

a. Esempio di tetto freddo con guaina riflettente.
Fonte: <https://www.gossr.it/>

b. Schema di realizzazione di una tipologia di tetto freddo ventilato.
<https://www.edilportale.com/tetto-ventilato>



a



b

sua volta, per evitare fessurazioni causate dagli sbalzi di temperatura e per risolvere questo problema si utilizzano resine acriliche. Questo tetto richiede una manutenzione ordinaria continua della resina ed espone troppo il solaio agli sbalzi di temperatura.

Una copertura con una superficie riflettente evita, invece, il trasferimento di calore agli ambienti sottostanti. Il tetto riflettente, cosiddetto tetto freddo, può essere realizzato con diverse

finiture, tra cui tegole, ghiaia e membrane metalliche. Numerosi studi confermano i benefici di questo tipo di finitura in riferimento al risparmio sia del consumo energetico annuo che della manutenzione delle strutture e dei componenti edilizi [88]. L'incremento della riflettività solare del tetto con specifiche pitture di colore bianco ne riduce la temperatura anche di 40°C e l'EPA (U.S. Environmental Protection Agency) calcola che la riduzione della trasmis-

sione del calore estivo verso l'interno dell'edificio circa dell'80% [89].

Le membrane autoprotette con lamina in rame o alluminio sono dotate di una elevata riflettività solare ma sono penalizzate dal fatto che i metalli, fino a che la superficie è lucente non smaltiscono il calore accumulato, quando si ossidano aumenta l'emissività ma contemporaneamente si riduce la riflettività e inoltre finché non si ossidano lo smaltimento di calore è lento. Una soluzione è realizzata con pannelli isolanti accoppiati a guaina riflettente di colore chiaro esclude

un accumulo di calore sulla superficie, preservando lo strato coibente sottostante. Spesso le soluzioni di tetto freddo sono associate a tecnologie per ventilarlo. Nello specifico, sopra allo strato isolante vi è un'intercapedine d'aria continua dalla linea di gronda alla linea di colmo, con una sezione d'uscita dell'aria maggiore della sezione d'ingresso. La camera di ventilazione, con il passaggio continuo dell'aria, elimina la presenza di condensa, mantenendo il manto ed i materiali che compongono la copertura asciutti.

Bibliografia

1. Grosso, M., *Il raffrescamento passivo degli edifici: concetti, precedenti architettonici, criteri progettuali, metodi di calcolo e casi di studio*, Maggioli, **1997**.
2. Monaco, A., *La Casa Mediterranea—modelli e deformazioni*. Quaderni Isam, Magna editore, **1997**.
3. Galdieri, E., Sull'architettura islamica in Sicilia. Sull'architettura islamica in Sicilia, **2000**, pp. 1000-1033.
4. Grosso, M., Santamouris, M., Butera, F. M., Raimondo, L., Parisi, E., Simonetti, M., Ford, B., *Il raffrescamento passivo degli edifici in zone a clima temperato: principi e archetipi bioclimatici, criteri progettuali, metodi di calcolo, esempi progettuali e applicativi*. Maggioli, **2011**.
5. Moretti, G., *Abitare il deserto*, Tipoarte, **2007**.
6. Jomehzadeh, F., Nejat, P., Calautit, J. K., Yusof, M. B. M., Zaki, S. A., Hughes, B. R., Yazid, M. N. A. W. M., *A review on windcatcher for passive cooling and natural ventilation in buildings, Part 1: Indoor air quality and thermal comfort assessment*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 70, **2017**, pp 736-756.
7. Fathy H., *Natural Energy and Vernacular Architecture. Principles and Examples with Reference to Hot Arid Climates*, The University of Chicago Press, **1986**.
8. Picone, A., *La casa araba d'Egitto: costruire con il clima dal vernacolo ai maestri contemporanei*, Editoriale Jaca Book, **2009**.
9. G. Ighany, *Le torri del vento in Iran*, in Agathon, Recupero e fruizione dei contesti antichi n.2, **2008**.
10. Fathy, H., Abd-El-Rahman, A. S., *The Malqaf: a traditional cooling and ventilation system*, in Sunworld n. 9, **1985**, pp. 48-62.
11. Chiarenza, S., *Abitare il deserto. Il cielo artificiale delle dimore ipogee in Tunisia*, in Sesto Forum Internazionale di Studi "Le Vie dei Mercanti. Cielo dal Mediterraneo all'Oriente" Vol. 14, Edizioni Scientifiche Italiane, **2009**, pp. 479-484.
12. Settis, S., *Ninfei romani e ninfei greci*, in Rivista di Filologia e di Istruzione Classica n. 96, **1968**.
13. Parisi, A., Fidelibus, M. D., Monno, V., Parisi, M., Parisi, N., Specchio, V., Spilotro, G., *Le cavità antropiche di Gravina in Puglia (Bari, Puglia): aspetti storici e geotecnici*, in Opera Ipogea atti del IX Convegno nazionale di Speleologia, **2020**.
14. Gallo, C., *Architettura bioclimatica*. Istituto Nazionale di Architettura, Roma, **1995**.
15. Balocco, C., Farneti, F., & Minutoli, G., *I sistemi di ventilazione naturale negli edifici storici: Palazzo Pitti a Firenze e palazzo Marchese a Palermo*, Alinea Editrice, **2009**.
16. Brogiolo, G. P., Simeone, N., Possenti, N., & Giovè Marchioli, N., *La chiesa rupestre di S. Cassiano (Lumignano di Longare-Vicenza)*, in Archeologia Medievale XXIII, **1996**, pp. 243-274.
17. Alkaff, S. A., Sim, S. C., Efzan, M. E., *A review of underground building towards thermal energy efficiency and sustainable development*. Renewable and Sustainable Energy Reviews n. 60, **2016**, pp. 692-713.

18. Mechiat, S., Dekoumi, D., *Les facettes de l'architecture traditionnelle aurassienne, cas de Rhoufi*. Sciences & Technologie, Sciences de la Terre, **2018**, pp. 145-157.
19. Abo-Elazm, F., Ali, S., *The concept of local smart architecture: An approach to appropriate local sustainable buildings*. International Journal of Cultural Heritage, 2, **2017**, pp. 1-12.
20. Whitcomb, D., Taha, H., *Khirbat al-Maffar and its place in the archaeological heritage of Palestine*. Journal of Eastern Mediterranean Archaeology & Heritage Studies, 1(1), **2013**, pp. 54-65.
21. Lofrano, G., Carotenuto, M., Maffettone, R., Todaro, P., Sammataro, S., Kalavrouziotis, I. K., *Water collection and distribution systems in the Palermo Plain during the Middle Ages*. Water, 5(4), **2013**, pp. 1662-1676.
22. Firrone, T., *Le camere dello scirocco: archetipi bioclimatici della Palermo antica*. In Fatta Giovanni (a cura di), Palermo Città delle Culture. Contributi per la valorizzazione di luoghi e architetture, Palermo: 40due edizioni, **2014**, pp. 43-52.
23. Firrone, T. R. L., Bustinto, C., Davide, C., *The Sirocco's chamber of Micciulla manor in Palermo: a bioclimatic archetype symbol of legality and civil redemption*, in XVII International Forum "Le Vie dei Mercanti". World Heritage and Legacy. Culture, creativity, contamination Vol. 4, Gangemi, **2019**, pp. 653-664
24. Saeli, M., & Saeli, E., *Analytical studies of the Sirocco room of Villa Naselli-Ambleri: A XVI century passive cooling structure in Palermo (Sicily)*. Journal of Cultural Heritage n. 16(3), **2015**, pp. 344-351.
25. Todaro P., *Progetto per la valorizzazione e fruizione turistica del qanat dell'Uscibene e della camera di scirocco di Villa Savagnone a Palermo*, in Geologia di Sicilia XIV, **2006**, pp. 9-20.
26. Moretti, G., & Bori, D., *La casa di Hatra: l'uso delle risorse ambientali e climatiche nella tradizione abitativa mediterranea*. Tipoparte, **2005**.
27. Bahauddin, D. K. A. A., *Analysis of the architectural elements in traditional courtyard houses in Irbid, Jordan*, in Advances in Environmental Biology n. 9(3), **2015**, pp. 112-116.
28. Saranti, K., *Air moving in and through building: historical prototypes and contemporary applications*, in International Workshop on Energy Performance and Environmental Quality of Buildings. Milos Island, Greece, **2006**.
29. Chirco A., *Palermo la città ritrovata, itinerari fuori le mura*, Dario Flaccovio editore, Palermo, **2006**.
30. Moretti, G., *Un riparo nel deserto*. Franco-Angeli, **2012**, pp. 88-91.
31. El Semaary, Y., Attalla, H., Gawad, I., *Modern Mashrabiya with High-tech Daylight Responsive Systems*, in The International Conference: Cities Identity Through Architecture and Arts (CITAA), Vol 1, issue 1, **2017**.
32. Croce, S., *Architecture and adaptation*, in TECHNE-Journal of Technology for Architecture and Environment, 2020, pp. 33-38.

33. Bux E., traduzione di *Senofonte: Memorabilia (Ricordi a Socrate)*, **1956**.
34. Alexandrinus, H., Aleotti, G. B., *Gli artificiosi e curiosi moti spirituali di Herone*, Carlo Zenaro, **1647**.
35. Gorica, S., *Edilizia domestica di età ellenistica in Epiro e Illiria meridionale*, in A. Haug e D. Steuernagel (a cura di), *Hellenische Häuser und ihre Funktionen*, International Tagung Kiel, **2013**, pp. 177-196.
36. Bearzi, G., Bearzi, V., *Architettura degli impianti. Da una ricerca esemplificativa nel passato una prospettiva per il prossimo futuro*. Tecniche Nuove, **1997**.
37. Romizzi, L., *La Casa dei Dioscuri di Pompei (VI 9, 6.7): una nuova lettura*, L'Erma di Bretschneider, 2006, pp 79-160.
38. Pulvirenti E., *Artelogia*, Zanichelli, vol. 1 – vol. 3, **2021**.
39. Pinto, M. R., *Il riuso edilizio. Procedure, metodi ed esperienze*, Utet, Torino, **2004**
40. De Giovanni G., *Pantelleria: materia e memoria, su "Demetra"*, n. 11, Alloro ed. Palermo, **1998**, p. 26.
41. Brignone F., *U jardinu*. Dario Flaccovio Editore, Palermo, **2001**.
42. Miosi, M., *Trulli e capanne in pietra a secco pugliesi: tra storia, semantica e antropologia*, Edizioni di Pagina, **2021**.
43. Laureano P., *Giardini di pietra, i Sassi di Matera e la civiltà mediterranea*, Bollati Boringhieri, Torino, **1993**.
44. Mamì, A. Caleca, E., Nicolini, E., *Favignana bio-calcarenite: technological culture, knowledge and recovery*, in Mileto, C., Vegas, F., Cristini, V., García-Soriano L., Heritage 2022 International conference Vernacular Heritage: Culture, People and Sustainability, edUPV, **2022**, pp. 393-400
45. Caterina, G., *La Tecnologia del Recupero Edilizio: esperienze e strategie*, Firenze University Press, **2006**
46. Lucchi, E., Pracchi, V., *Efficienza energetica e patrimonio costruito. La sfida del miglioramento delle prestazioni nell'edilizia storica*, Maggioli Editore, **2013**
47. Davoli P., *Architettura senza impianti: aspetti bioclimatici dell'architettura preindustriale*, Alinea, **1993**.
48. Germanà, M.L., *A still to be explored heritage: stone and earthen architecture in Sicily / Un patrimonio ancora da esplorare: architettura in pietra e terra in Sicilia*, in S. Meca, S. Briccoli Bati, M.C. Forlani, M.L. Germana' (a cura di), *Earth / Lands. Eathern Architecture of Southern Italy / Architettura di terra nell'Italia del Sud*, **2011**, pp. 280-290
49. Bogoni, B., *An "ancient dialogue" between matter, technique and design*, in *TECHNE-Journal of Technology for Architecture and Environment*, **2018**, pp. 325-336
50. Brunetti, O., *Residenze corsiniane fra Firenze e Roma. Il sistema delle residenze nobiliari*, Stato Pontificio e Granducato di Toscana, Rome, **2003**, pp. 95-106.
51. Milizia, F., Sanese, G. B. C., *Principi di architettura civile: di F. Milizia*. Riveduta, emendata, ed accresciuta di figure diseguate ed incise a Roma da GBC Sanese, Bassano, **1813**.
52. Butera, F., *Dalla caverna alla casa ecologica*.

- Storia del comfort e dell'energia*, Edizioni ambiente, **2004**.
53. Capaccioli, L., *Bruno Taut. Visione e progetto*, Edizioni Dedalo, 1993.
 54. Corbusier, L., *La carta di Atene. L'urbanistica dei tre insediamenti umani*, Etas-Kompass, **1967**.
 55. Koolhaas, R., *La Ville Radieuse*, in Palazzo C., Vio R., a cura di, *Sulle Tracce di Le Corbusier*, Arsenale Editrice, Venezia, **1989**.
 56. Taylor, B. B., Corbusier, L., *La cité de refuge di Le Corbusier: 1929/33*, University of Chicago Press, **1979**.
 57. Ramírez-Balas, C., Fernández-Nieto, E. D., Narbona-Reina, G., Sendra, J. J., Suárez, R., *Numerical simulation of the temperature evolution in a room with a mur neutralisant. Application to "The City of Refuge" by Le Corbusier*, in *Energy and buildings* n. 86, Officina Ed., **2015**, pp. 708-722.
 58. Sampò, L., *Le Maisons Jaoul di Le Corbusier: la petite maison e la città contemporanea*. FrancoAngeli, **2010**.
 59. Smith, N. K., *Frank Lloyd Wright* (Vol. 62). Edizioni Dedalo, **1983**.
 60. Turner, P. V., *Frank Lloyd Wright's Other Larkin Building*, in *Journal of the Society of Architectural Historians*, 39(4), **1980**, pp. 304-306.
 61. Estoque, J., *Heating and cooling Robie house*. APT Bulletin, 19(2), **1987**, pp. 38-51.
 62. Futagawa, Y., *Frank Lloyd Wright: monograph 1924-1936*. ADA Edita Tokyo, 1988.
 63. Aalto, A., Mattila, S., Ervi, A., *Municipal Library in Viipuri: Description of the Building's Construction*. Päivi Lukkarinen, Kaupunginkirjasto, **1927**, pp. 1933-35.
 64. Tornieri, S., *Ageing architecture: il paesaggio come fattore curativo*. Quodlibet, **2019**, pp. 149-157.
 65. Schaller, C., *Aesthetic control management in the German planning process*, in *Urban Design International*, 4(1-2), **1999**, pp. 39-45.
 66. Tucci, F., *Ventilazione naturale in architettura*, Altralinea Edizioni, 2021
 67. LEED BD+C: New Constructionv2 - LEED 2.2, *Tercero South Student Housing Phase II*, <https://www.usgbc.org/projects/tercero-south-student-housing-phase-ii>
 68. Straube, J., *Air Flow Control in Buildings*. Building Science Corporation, USA, **2007**.
 69. Tucci, F., Battisti, A., Cimillo, M., Calcerano, F., *Natural ventilation and passive cooling for energy efficiency of residential buildings in Mediterranean climate*, in *CSE-City Safety Energy*, (1), **2015**, pp. 156-165.
 70. Campioli, A., Ferrari, S., Lavagna, M., Monticelli, C., Morello, E., *Involucri in laterizio*, in *Ricette di chiusura*, Costruire Consorzio POROTON Italia, **2006**
 71. Dezzi Bardeschi, M., Guarisco, G., Zaccheo, F., Becattini, G., *L'Intervento di conservazione e consolidamento dei solai lignei dell'ex chiesa della trasfigurazione a Cantù (CO)*, in *XXV Convegno internazionale scienza e beni culturali* Edizioni Arcadia Ricerche srl., **2009**, pp. 835-846.
 72. Hutton, S. *Museum Brandhorst-Munich, Germany*, in *The Architecture of Art Museums*, Routledge, **2014**, pp. 250-263.

73. Molinari, C., Rigamonti, E., Talamo, C., *Elementi di cultura tecnica: Lezioni del corso di materiali e progettazione di elementi costruttivi*, Maggioli, **1998**
74. Ciampi, M., Leccese, F., Tuoni, G., *Pareti ventilate e normativa tecnica*, in Proceedings of the 56th National Congress, **2001**, pp. 95-106.
75. Torricelli M.C., Del Nord R., Felli P., *Materiali e tecnologie dell'architettura*. Ed. Laterza, Bari, **2001**.
76. Franchino, R., Muzzillo, F., Violano, A., *Performance of envelope: an innovative energy system*, in TECHNE-Journal of Technology for Architecture and Environment, **2014**, pp. 217-224.
77. Torricelli, M. C., Marzi, L., *Le facciate ventilate in cotto di Renzo Piano*, in Costruire in Laterizio n. 71, **1999**, pp. 36-47.
78. Cholet K., *Il grattacielo Intesa Sanpaolo di Renzo Piano a Torino*, <https://www.architetturaecosostenibile.it/architettura/progetti/grattacielo-intesa-sanpaolo-renzo-piano>
79. Karadag, I., Cakmakli, A.B., *Interface of the Natural Ventilation Systems with Building Management Systems*. Periodica Polytechnica Architecture n. 51, **2020**, pp. 178-188.
80. Cellai, G., Secchi, S., Nannipieri, E., Baldini, S., *Ottimizzazione di schermature solari sotto i profili acustico e illuminotecnico*. Atti dell'Associazione Italiana di Acustica, 38° Convegno Nazionale Rimini, **2011**.
81. Argenti, M., Azzaro, B., *Spazi per l'università nell'architettura contemporanea*, in Rassegna di Architettura e Urbanistica, Quodlibet, Sapienza Università di Roma, **2018**.
82. Minutoli, F., Savoca, L. M., *Edilizia ecosostenibile: L'uso intelligente di pannelli decorativi con materiali riciclabili*, in Sustainability in construction n. 55, **2022**.
83. Bracchini D., *Architettura uffici: Goring & Straja per Green Place a Milano*, <https://www.teknoring.com/news/progettazione/architettura-uffici-goring-straja-per-green-place-a-milano>
84. Giovannini, L., Baracani, M., Favoino, F., Capozzoli, A., Serra, V., Verso, V. L., Pellegrino, A., *Analisi di componenti trasparenti dinamici: prestazione energetica, comfort e strategie di controllo* in Report Ricerca di Sistema Elettrico, ENEA, **2018**.
85. Romano, R., *Superfici trasparenti innovative*. Firenze University Press, **2011**, pp. 117-155.
86. Zinzi, M., & Agnoli, S., *Involucro trasparente ed efficienza energetica: Tecnologie, prestazioni e controllo ambientale*. Dario Flaccovio Editore, **2014**.
87. Progetto CMR Studio, *Glass Building*, <https://www.progettocmr.com/project/glass-building-2/>
88. Brunetti, G. L., *Considerazioni sulle prestazioni ambientali delle coperture ventilate in falda per contesti in via di sviluppo a clima caldo*, in TECHNE: Journal of Technology for Architecture & Environment, **2014**
89. U.S. Environmental Protection Agency, *Cool roofs in Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies*, <https://www.epa.gov/heatislands/using-cool-roofs-reduce-heat-islands>

Capitolo II

Soluzioni Nature-based integrate negli edifici esistenti

Chapter 2. Nature-based solutions integrated in existing buildings

Over time, there has been an increasing interest in retrofit interventions on the built environment, enriching architecture with vegetation by integrating the latter on walls, sometimes through double-envelope systems or air cavities, on the roof, and as a covering for partition walls. Even though nature-based solutions have been investigated for decades by the scientific community, they have been considered for the first time as a political tool only in 2017 by United Nations, together with international financial organizations (The Nature Conservancy, International Union for the Conservation of Nature e World Bank) [1, 2], aiming at urban actions for adaptation and mitigation of climate change, at the sustainable use of resources and the conservation of biodiversity [3].

In Europe, this issue is being discussed since 2015, considering NBS not only as an alternative tool to deal with social needs and improve natural environments

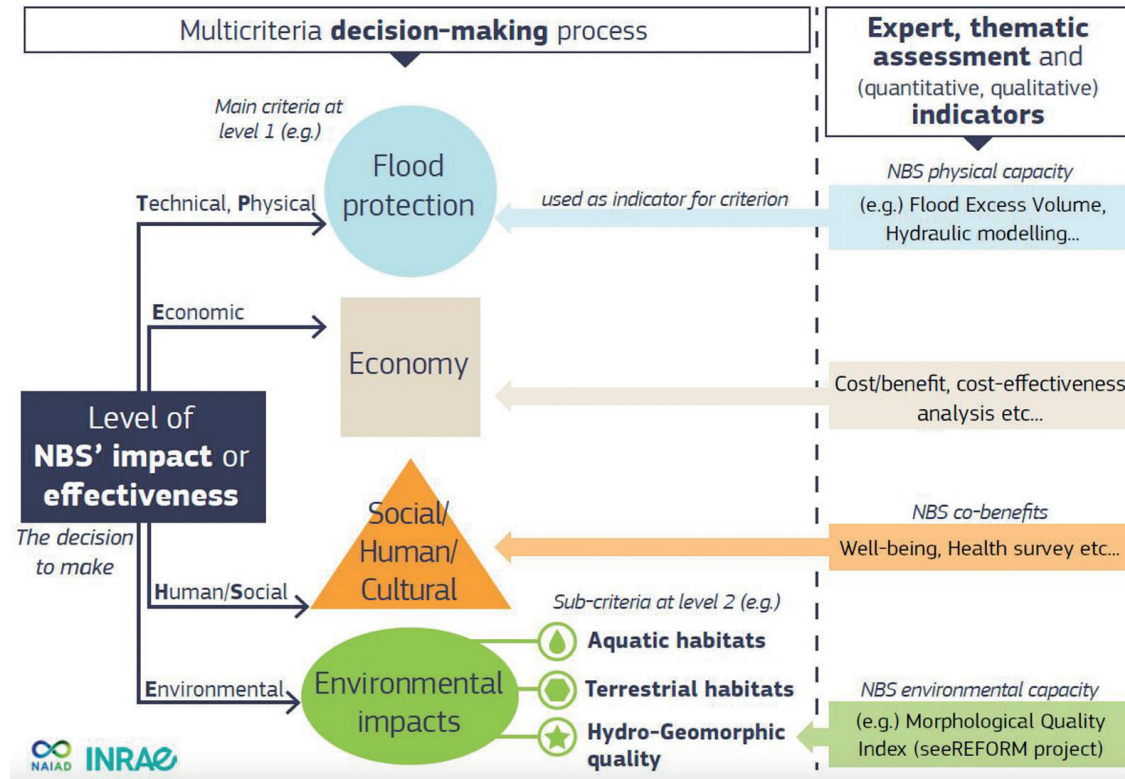
but also to promote green innovation and resilience in cities [4]. The complex situation of urban density and global warming has been the starting point for worldwide initiatives such as the 2030 Agenda and Sustainable Development Goals, in which technologies for the preservation of biodiversity, such as NBS, can contribute to the well-being of cities and the whole society, and support in the current challenges, such as climate change. In this sense, they fully fulfill community needs, in particular, Goal 11 “Make cities and human settlements inclusive, safe, resilient and sustainable”. NBS can be implemented to fulfill a range of specific functions (for example, flood reduction, air temperature reduction, etc.), both with reference to quantitative parameters (e.g., accumulated water volume) or qualitative metrics, such as indices to evaluate the well-being of the population [5]. Urban nature can diffuse socio-ecological benefits, with participative approaches that go beyond the controlled management of the financial market [6, 7].

The European Commission (2015) identified four main goals that NBS can fulfill at a global scale [9]: improvement of sustainable urbanization and human well-being, stimulating economic growth through more attractive cities; restoration of decayed ecosystems, improving resilience and providing vital ecosystemic services; adaption and mitigation of climate change, reducing carbonium stocking; improvement of risk management and resilience, providing synergies in the reduction of multiple risks.

In existing buildings, nature-based solutions are compatible with retrofit interventions thanks to their characteristics of minimum interventions and reversibility, and improve the performance of the building envelope, with positive effects on indoor comfort. In general, these solutions are characterized by easy assembly and dismantling, as they are dry-applied, independent from their support, adaptable, and modulable. Moreover, the technique of plant pre-cultivation allows obtaining instant covering also for large surfaces. Vegetation can significantly improve the energy efficiency of the building and comfort in the close neighborhood; at a larger scale, it provides significant benefits in the three dimensions of sustainability.

Several studies associate nature-based solutions with human and environmental well-being, as they can

improve air quality through the deposit of polluting particles on the leaves and their subsequent dispersion in the atmosphere [10, 11, 12, 13]. This makes them particularly advantageous in dense urban environments, as they protect the community also from the exposition to polluting substances related to urban traffic. In synthesis, the following benefits can be appreciated: thermo-hygrometric comfort in terms of outdoor [14] and indoor cooling [15, 16] through the water vapor exchange between vegetation and atmosphere produced by the combined effect of plant transpiration and the evaporation of the water contained in them [17]; - thermo-hygrometric comfort in terms of increase of thermal inertia in the envelope, through constant heating of the indoor environment by 2°C more than the envelope without the green wall [18]; - protection from dazzling, thanks to the capacity of vegetation to absorb solar radiation during photosynthesis [19]; - variable acoustic comfort according to the density of the leaf area, through the absorption of medium and high frequencies, that is above 1,000 Hz [20, 21]; improvement of air quality, through the capacity of plants to absorb carbon anhydride or other polluting particles in the atmosphere [22, 23]; building management, through the support in rainwater treatment.



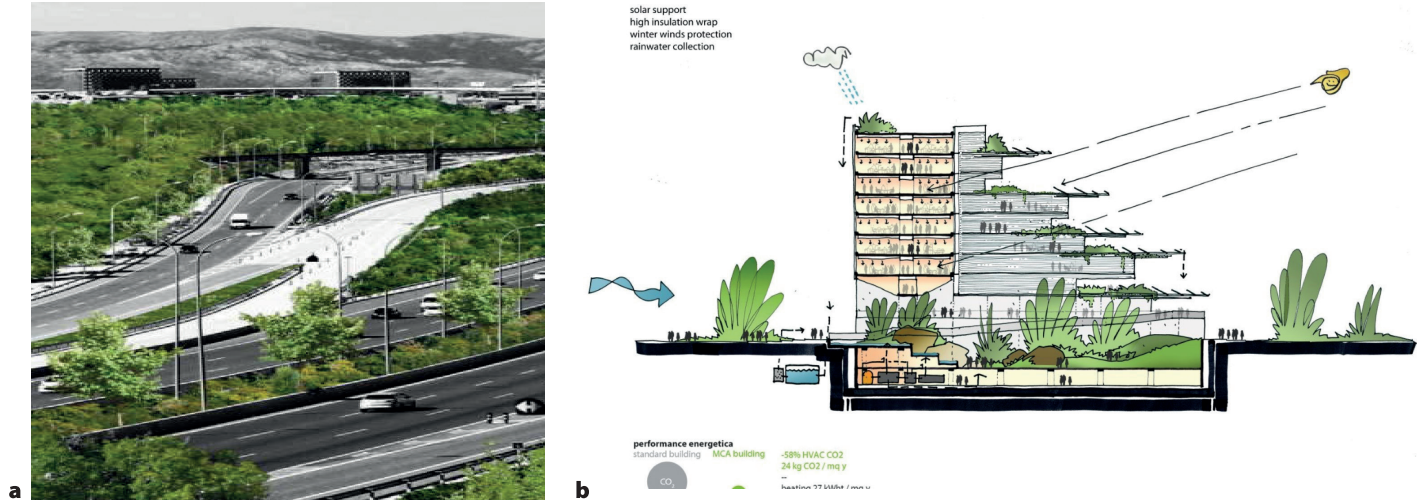
Impatti delle NBS combinati in un quadro decisionale multicriterio che include gli aspetti tecnici (T), organizzativi (O), fisici (P), umani (H), economici (E) e ambientali (E).
Fonte: Tacnet, J.-M., Piton, G., et. Al., 2021 [8]

2.1 Benefici per il comfort termoigrometrico

Le soluzioni nature-based possono agire come regolatori termici naturali, contribuendo al miglioramento del microclima nelle città sia all'interno che all'esterno degli edifici, come un regolatore naturale contro le temperature raggiunte a causa del cambiamento climatico [24, 25]. I benefici in questione si rivelano più efficienti e controllabili nel caso di ambienti

confinati, poiché la dimensione contenuta dello spazio d'azione e il limitato volume d'aria su cui i vegetali si trovano ad agire sono maggiormente gestibili se confrontati alle dimensioni potenzialmente illimitate dello spazio aperto.

La letteratura mostra la capacità delle soluzioni nature-based di schermare l'involucro edilizio con conseguente riduzione della temperatura superficiale della parete esterna dell'edificio fino a 15° C sul versante sud-ovest [26]



a. Progetto dello studio ARUP per il cambiamento climatico del comune di Madrid. Inverdimento delle infrastrutture esistenti in Calle Alberto de Palacio

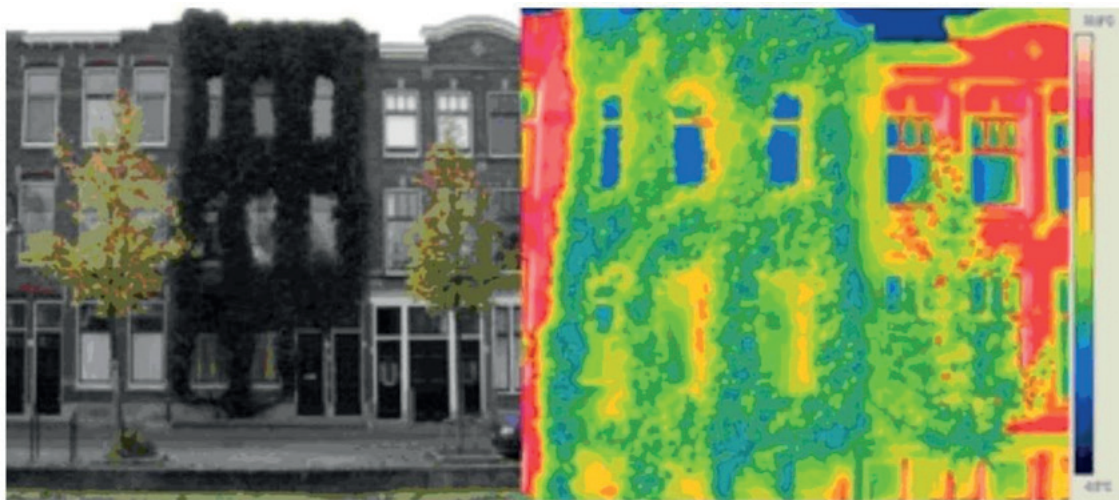
Fonte: [/https://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/Sostenibilidad/EspInf/EnergiayCC/04CambioClimatico/4c3Mad+Natural/Ficheros/Mad+Natural_en.pdf](https://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/Sostenibilidad/EspInf/EnergiayCC/04CambioClimatico/4c3Mad+Natural/Ficheros/Mad+Natural_en.pdf)

b. Giardini pensili integrati che favoriscono il raffrescamento degli ambienti e l'ombreggiamento dell'involucro vetrato Edificio SIEEB a Pechino; progetto dell'Architetto Mario Cucinella
 Fonte: <https://www.mcarcitects.it/project/sino-italian-ecological-and-energy-efficient-building>

e fino a 8° C nella cavità d'aria tra l'involucro verde e il muro [27] e un raffreddamento costante di 2° C all'interno [28].

La parete verde può costituire una barriera al vento, attenuando l'effetto del vento diretto sul paramento murario dell'edificio. Bloccando il vento, la parete verde contribuisce ad aumentare l'efficienza energetica di un edificio [29], in particolare in inverno, il vento freddo gioca un ruolo cruciale riducendo l'efficacia dell'isolamento regolare [30]. Il passaggio d'aria attraverso l'apparato fogliare può, inoltre, influenzare la capacità di isolamento del sistema ma solo pochi studi hanno effettivamente considerato questo effetto e non è stato sempre studiato in modo approfondito [31] e alcuni tra questi esaminano i fenomeni che si verificano nell'intercapedine tra il paramento murario dell'edificio e la facciata verde, dove sembra verificarsi una variazione di umidità, oltre

che di temperatura e di velocità del vento, creando un microclima favorevole per le stagioni primaverili ed estive [32, 33, 34]. Un'analisi [35] ha indagato l'effetto del flusso d'aria su un involucro edilizio con parete verde, a doppia pelle, situata a Rotterdam (Paesi Bassi): i parametri misurati sono la temperatura della superficie della parete esterna, la temperatura dell'aria e la velocità del vento a 1 m e 10 cm davanti alla facciata e nell'intercapedine d'aria. La velocità del vento non varia tra 1 m e 10 cm; la temperatura superficiale della parete esterna è inferiore di 2,7 °C rispetto la temperatura dell'aria; all'interno del fogliame nella facciata verde a doppia pelle si registra una la velocità del vento minore di 0,55 m/s, mentre, nell'intercapedine d'aria è minore di soli 0,29 m/s rispetto alla velocità del vento a 10 cm davanti alla facciata. Le misurazioni sono state effettuate in autunno senza sole diretto e



Facciata ricoperta da edera di Boston (Parthenocissus) radicata nel terreno e applicata direttamente contro la facciata ripresa con una telecamera a infrarossi (Delft, Paesi Bassi, estate 2009, 12:00, temperatura dell'aria 21°C).
Fonte: Perini, K., Ottel , M., et. Al., 2013 [35]

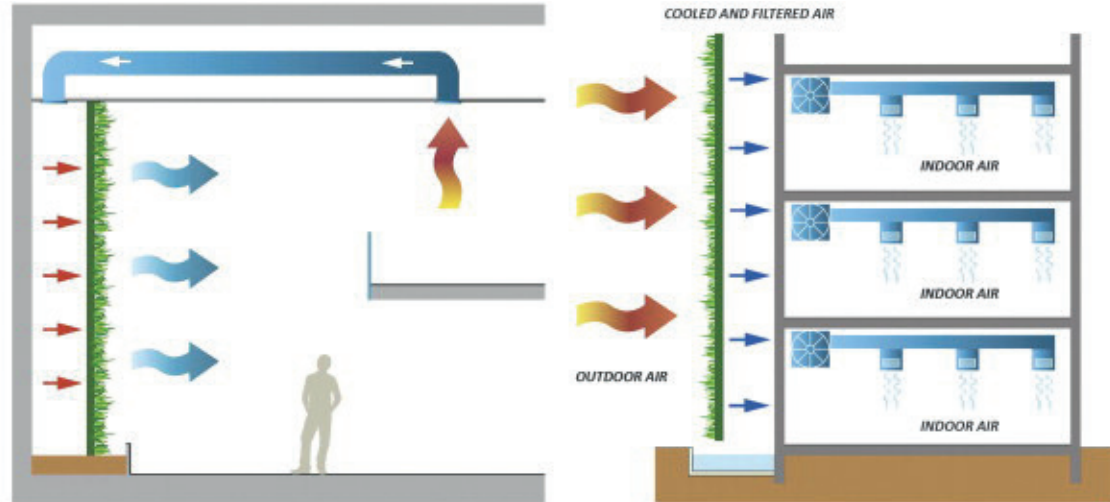
con temperature della superficie esterna inferiori a 18° C [35].

Diversi studi hanno analizzato l'effetto delle pareti verdi con risultati che confermano la capacit  delle pareti verdi di generare ombra sulle pareti degli edifici, e la rilevanza del microclima all'interno dell'edificio. Tra questi, alcuni si focalizzano sulla risposta all'irraggiamento, registrando nei momenti di picco una differenza di temperatura fino a 20° C tra la parete senza e con green wall, durante le giornate nuvolose le differenze di temperatura riducono i loro valori a 1-2° C [36, 37]. La capacit  di regolare le temperature avviene grazie allo scambio di vapore acqueo tra la vegetazione e l'atmosfera per effetto congiunto della traspirazione delle piante e dell'evaporazione dell'acqua in esse contenuta [38]. Nel momento in cui il paramento vegetale riceve la luce solare, il 5-30% dell'energia solare che colpisce la

foglia viene riflessa, il 5-20% viene utilizzata per la fotosintesi, il 10-50% viene trasformata in calore, il 20-40% viene utilizzata per l'evapotraspirazione, e il 5-30% passa attraverso la foglia [39, 40]. L'evapotraspirazione   la somma dell'evaporazione e della traspirazione della pianta; la prima   il movimento dell'acqua nell'aria; la traspirazione avviene quando la vegetazione assorbe l'acqua attraverso le radici e la riemette in atmosfera sotto forma di vapore attraverso le foglie. L'evapotraspirazione dipende dalla quantit  di acqua fatta evaporare e traspirata e dalla capacit  della bassa atmosfera di trasportare l'umidit  evaporata lontano dalla superficie terrestre, dunque, maggiore   la temperatura di un'area, maggiore   l'evapotraspirazione. Il fenomeno   anche pi  elevato nelle giornate ventose perch  l'umidit  evaporata pu  essere rapidamente spostata dalla superficie delle piante.

Sistema di parete viva attiva sviluppato e brevettato presso la Scuola Tecnica Superiore di Ingegneria Agronomica di Siviglia (Spagna) che può raffrescare l'ambiente indipendentemente come sistema passivo (a) o combinato con il sistema di condizionamento e ventilazione dell'edificio (b).

Fonte: Franco, A., et. Al., 2012 [41]



Uno studio che ha utilizzato una galleria del vento a bassa velocità per studiare il comportamento dei diversi substrati utilizzati nelle pareti verdi mostra che la capacità di raffreddamento è effettiva con una bassa velocità dell'aria e che il consumo d'acqua per il mantenimento delle piante è maggiore con velocità d'aria elevata; un'elevata velocità dell'aria determina danni alla vegetazione ed essiccazione del substrato; l'intervallo di velocità dell'aria consigliato è compreso tra 0,25 e 0,5 ms; la presenza di vegetazione produce una maggiore resistenza al flusso d'aria dell'involucro ma comporta un aumento del consumo di acqua (22,6% in media) [41].

L'effetto barriera è stato dimostrato da una simulazione mediante software effettuata per testare la riduzione del vento dovuti alla vegetazione con effetto sulle prestazioni energetiche. La simulazione condotta utilizzando il softwa-

re Shadow Pattern Simulation (SPS) per testare gli effetti dell'irraggiamento in residenze simili situate in diversi climi statunitensi, ha dimostrato che la parete verde è vantaggiosa per la riduzione dei venti invernali, fornendo, allo stesso tempo, l'accesso solare alle pareti sud ed est e ciò riduce la richiesta di riscaldamento dell'8% [42].

Una possibilità che emerge dalla letteratura è il raffrescamento dell'ambiente prossimo alla parete verde attraverso evapotraspirazione contrastando il fenomeno dell'isola di calore urbana (UHI) in aree urbane molto dense, dove numerose architetture costruite con materiali come cemento, vetro e metalli tendono a riflettere la radiazione solare incidente nell'intorno con un aumento significativo delle temperature. In termini di orientamento della facciata, lo strato vegetale è particolarmente efficace nel raffrescare le facciate est e ovest che sono espo-

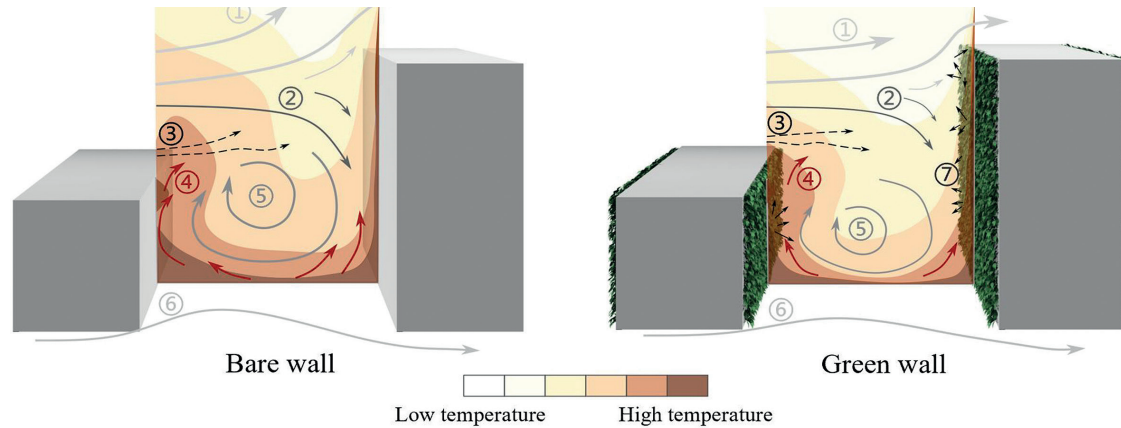


Illustrazione delle potenziali influenze delle pareti verdi sul flusso d'aria e sulla temperatura in un canyon stradale. I possibili fenomeni di ventilazione sono: 1. flusso d'aria verso l'alto, 2. flusso d'aria verso il basso, 3. flusso tangente la copertura, 4. flussi caldi, 5. moto convettivo a livello del suolo, 6. flusso d'aria laterale, 7. aria refrigerante vicino alla vegetazione.

Fonte: Li, H., Zhao, Y., et. Al., 2022 [47]

ste ai massimi livelli di irraggiamento solare e ciò dovrebbe essere considerato nella strategia di progettazione architettonica con la stessa importanza dell'orientamento sud [43]. Le analisi mostrano che per le stagioni primaverili ed estive sia i valori di ombreggiamento nonché le temperature superficiali delle pareti dell'involucro edilizio confermano la grande capacità della green wall di intercettare la radiazione solare, con una riduzione rispetto all'involucro senza green wall fino al 71% per la parete esposta a est e fino al 57% con orientamento a ovest [44]. Nel caso in cui vi sia uno spazio intermedio tra la parete verde e il muro, si viene a creare un microclima caratterizzato da temperatura più bassa e maggiore umidità [45]. Altri risultati dimostrano l'efficacia del comportamento del verde verticale in climi umidi e caldi come la Malesia, con riduzioni fino a 8°C nella cavità d'aria tra la vegetazione e il paramento murario e una riduzione della temperatura dell'aria fino a 4°C [46].

In relazione agli effetti sulla riduzione dell'isola di calore urbano, alcune sperimentazioni hanno simulato l'effetto accoppiato della resistenza aerodinamica e termica delle pareti verdi per un modello urbano semplificato di un canyon stradale. I campi di flusso e di temperatura dell'aria, misurati in una galleria del vento, rivelano l'effetto della resistenza aerodinamica e termica delle pareti verdi con una riduzione della temperatura al livello pedonale al centro del canyon di 1,16 °C e di 0,48 °C nella zona più alta. La vegetazione porosa funge da resistenza termica riducendo il trasferimento di calore convettivo, con conseguente abbassamento della temperatura dell'aria al centro del canyon [47].

Alcuni studi hanno dimostrato che le soluzioni nature-based migliorano l'impronta ecologica e ambientale delle costruzioni e del contesto urbano circostante con riduzioni della temperatura ambientale fino a 5° C [48, 49, 50] e la creazione di zone d'ombra; ciò più evidente

in ambienti urbani densi. In particolare, uno studio [48] identifica l'influenza dei diversi sistemi di verde verticale sul microclima urbano. I risultati hanno mostrato una riduzione fino a 3,3 °C a una distanza fino a 15 cm a causa dell'effetto dell'evapotraspirazione.

In aggiunta, infatti, all'effetto del clima sulle prestazioni termiche di un edificio, è da considerare la variazione della crescita delle piante (densità delle foglie, altezza delle piante, ecc.) e la loro risposta fisiologica (traspirazione, posizione delle foglie, ecc.) in funzione degli agenti atmosferici [51]. In generale, le ricerche pregresse e in atto tendono a basare le proprie conclusioni su dati sperimentali provenienti da monitoraggi o simulazioni, con periodi di controllo brevi e incentrati sulla primavera-estate [39, 40, 43, 44], rendendo impossibile la conoscenza del comportamento della parete verde in altre stagioni, condizione a sua volta necessaria per lo studio del bilancio termico globale dell'edificio [52].

2.2 Benefici per la qualità dell'aria

Gli studi che riguardano i benefici indotti dalla vegetazione sull'assorbimento delle particelle inquinanti sono diversi e specifici per tipologia di inquinanti atmosferici e s'incentrano nell'analisi dei fattori che influenzano la fitodepurazione dell'aria e il loro processo nella diminuzione delle emissioni. Uno dei primi risale agli anni '90 e concerne l'idea di rimuovere i COV (Composti Organici Volatili) dall'aria interna da parte delle piante d'interni; l'idea fu

la base delle ricerche successive della National Aeronautics and Space Administration (NASA) sui sistemi biologici di supporto vitale per i viaggi nello spazio [53]. Tali studi hanno dimostrato una riduzione fino al 90% di COV in 24 ore in un ambiente con vegetazione [54, 55], registrando una variazione in funzione di una diversa regolazione dell'impianto di raffrescamento meccanico dell'ambiente indoor e in condizioni di luce o oscurità.

Altre analisi hanno mostrato che l'aumento della deposizione mediante la piantumazione di vegetazione nei canyon stradali può ridurre le concentrazioni a livello stradale fino al 40% per NO₂ (Biossido di Azoto) e 60% per PM (Particulate Matter) [56]. I flussi tortuosi nei canyon stradali sono stati simulati utilizzando modelli di fluidodinamica computazionale e i risultati riconoscono miglioramenti sostanziali della qualità dell'aria a livello stradale e che la vegetazione continua ad offrire benefici nella riduzione dell'inquinamento anche se la fonte di traffico viene rimossa dai centri urbani, producendo rapidi e duraturi abbattimenti delle emissioni nelle aree urbane dense.

Gli studi disponibili sugli impatti sulla qualità dell'aria della vegetazione collocata nei canyon stradali e nelle strade aperte [57] registrano alterazioni dell'esposizione agli inquinanti su scala locale apportate da alberi e siepi stradali concludendo che la vegetazione densa bassa con copertura completa dal suolo alla sommità della chioma (es. siepi) ostacola il flusso d'aria sottostante e quindi mostra generalmente un impatto positivo. In condizioni di strada aperta

sono da prediligere le barriere vegetali con una vegetazione densa e alta.

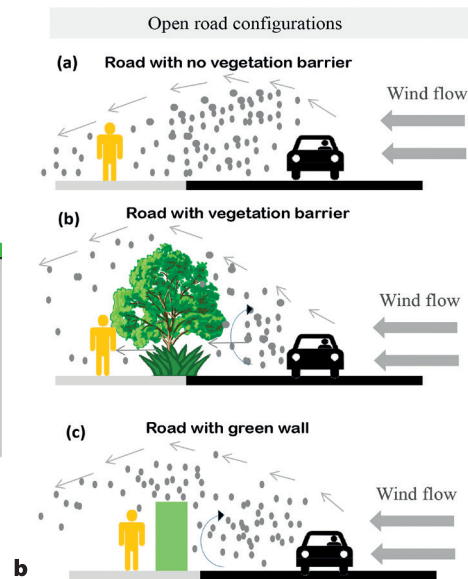
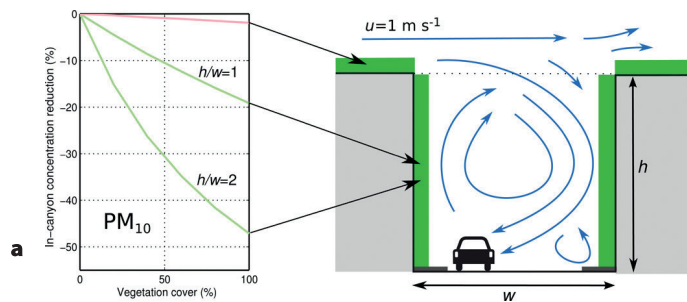
È dimostrata la capacità delle piante di assorbire e purificare i contaminanti organici [58] e la possibilità di rimozione della formaldeide fino al 20% e, inoltre, il range di umidità ha un ruolo essenziale nella capacità della vegetazione di assorbimento della formaldeide [59]. Uno studio che ha ricreato lo stesso ambiente fisico-chimico stimando la differenza di concentrazione degli inquinanti pre e post dotazione di vegetazione nell'ambiente e variando la tipologia di vegetazione, ha individuato il filodendro come tipologia vegetale maggiormente incline alla rimozione di formaldeide e di anidride carbonica dall'aria interna [54, 60].

Un'analisi su 73 specie vegetali ha condotto a selezionarne 20 in grado di modificare un ambiente contaminato da benzene in una mi-

sura compresa tra il 60–80% per 3 specie e il 20–40% per 17 specie, con diverse velocità di rimozione dell'inquinante [61, 62]. I principali agenti per la rimozione degli inquinanti dispersi in aria sono microrganismi situati nella rizosfera del terriccio ed esistono due metodi di controllo biologico dell'inquinamento atmosferico nei sistemi di pareti vegetali: la biofiltrazione e la fitodepurazione.

Altre analisi, che hanno studiato le differenze tra le specie vegetali, hanno selezionato l'aptenia cordifolia come specie indicata per creare un muro verde interno sostenibile per migliorare l'indice di salute negli ambienti interni dell'edificio [63]; altre, ancora, hanno vagliato *Chlorophytum Comosum* ed *Epipremnum Aureum* come specie efficaci per la rimozione di CO_2 .

Un interessante studio ha confermato l'efficienza di rimozione del particolato di una pa-



a. Schema dell'efficacia delle infrastrutture verdi integrate nelle facciate e nelle coperture degli edifici per il miglioramento della qualità dell'aria. Fonte: Pugh, T. A., et. Al., 2012 [56]

b. Modelli di dispersione degli inquinanti stradali in configurazioni di strade aperte (a) senza barriera vegetale (b) con vegetazione e (c) con parete verde. Fonte: Abhijith, K. V., et. Al., 2017 [57]

Schema dei vantaggi che le infrastrutture verdi apportano sulla qualità dell'aria in un ambiente costruito.

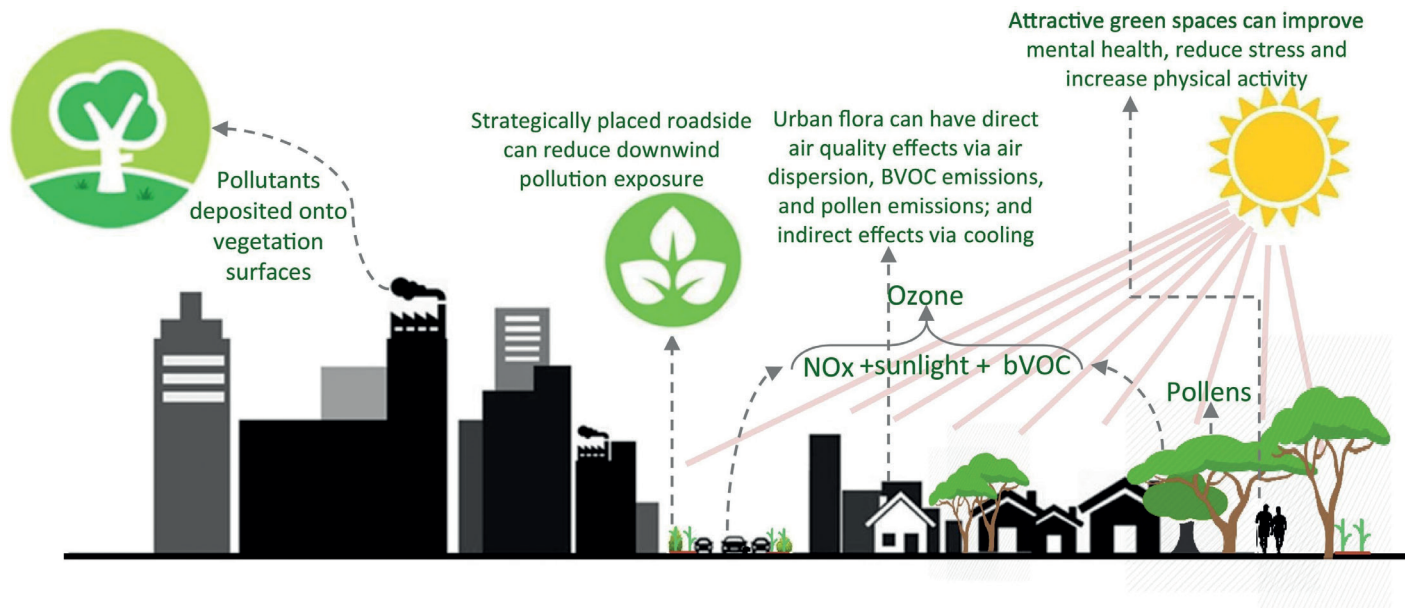
Fonte: Kumar, P., et. Al., 2019 [65]

rete verde, confrontandola con la capacità filtrante di un comune filtro HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) a pannello pieghettato MERV (Minimum Efficiency Reporting Value) [64]. La parete verde è stata testata in uno spazio confinato ed ermetico di circa 15 m³ e si è rilevata una necessità di portata di aria pulita e di ricambio d'aria molto modesta e quando l'intensità della luce è stata aumentata, la parete verde ha ridotto significativamente le elevate concentrazioni di CO₂ nell'ambiente, concludendo che una parete verde di 5 m², in condizioni luminose, potrebbe bilanciare le emissioni respiratorie di un occupante a tempo pieno [65].

Gli effetti positivi sulla salute umana correlati alla riduzione dell'inquinamento atmosfere-

rico attraverso la vegetazione urbana sono affermati e in aggiunta, la comunità scientifica sta lavorando all'idea che l'inverdimento urbano può generare benefici ampi come la riduzione delle malattie croniche, il rischio di stress e alterazioni psichiatriche [66]. Tuttavia, non ci sono prove empiriche che colleghino questi risultati e le linee guida ottimali per il suo dispiegamento nell'ambiente edificato devono ancora essere stabilite.

Il fenomeno della biofiltrazione dell'aria si ottiene mediante un ciclo di processi simultanei che vedono la degradazione dei composti chimici in corrispondenza delle radici e del terriccio ricchi di microorganismi (funghi, batteri, ecc.) che si nutrono delle particelle inquinanti [67, 68, 69]; avviene quindi in un biofiltraggio



dell'aria, naturale e totalmente passivo, prodotto dagli organismi che vivono in simbiosi con le piante e che necessitano di ossigeno per vivere. L'assorbimento radicale è legato alla concentrazione e alle proprietà degli inquinanti, alla specie/composizione della pianta, al tempo di esposizione e ad altre variabili di sistema.

Anche le foglie a loro volta contribuiscono alla diminuzione degli inquinanti con il fenomeno della fitodepurazione, assorbendo come nutrienti per la loro crescita una parte le sostanze disciolte in acqua e trasformate dai batteri. All'interno della foglia, i gas si diffondono negli spazi intercellulari e possono essere assorbiti da film d'acqua per formare acidi o reagire con le superfici interne delle foglie [70]. I microbi nella radice rimuovono i composti organici volatili nell'aria e l'inquinamento gassoso (monossido di carbonio e l'anidride carbonica) sono assorbiti dal fogliame, la fotosintesi può rimuovere CO² e produrre O². La qualità dell'aria è, inoltre, favorita dall'aumento dei livelli di umidità mediante la traspirazione fogliare e l'evaporazione dai mezzi di radicazione (suolo, sedimenti, fanghi, acque reflue) [54 ,71], fenomeno che, insieme ai benefici già espressi in relazione al comfort termico, riflette una possibilità di maggiore uso dei sistemi passivi per il controllo del microclima indoor a discapito di quelli meccanici, evitando l'eventuale immissione di inquinanti condotti dal sistema impiantistico.

Oltre ai benefici diretti relativi alla capacità di assorbimento delle emissioni inquinanti, l'intercettazione delle precipitazioni da parte delle infrastrutture verdi può ridurre il deflusso del-

le acque piovane. Tetti e pareti verdi, ma anche parchi urbani o minore vegetazione diffusa rappresentano, infatti, dei bacini di raccolta naturali che oltre ad avere impatti positivi sull'approvvigionamento di risorse idriche evitano un deflusso delle acque in ambito urbano; deflusso che raccoglie diversi inquinanti che si trovano sulle superfici pavimentate e che al termine del flusso piovoso evaporano contaminando l'aria.

2.3 Benefici per il comfort acustico

L'inquinamento acustico più comune, in particolare in ambienti urbani densi, è il rumore è generato dal traffico veicolare ma può derivare anche dalle azioni svolte all'interno degli edifici e dipendere dal tipo di destinazione d'uso. In ambito urbano diverse ricerche conducono alla riduzione dei livelli di rumore del traffico stradale risultando che le barriere vegetali riescono a ridurre rumori a frequenza elevata e che la larghezza della barriera è linearmente proporzionale alla quantità di assorbimento acustico [72].

Gli studi sulle soluzioni nature-based per la riduzione del suono non sono molti per le applicazioni in spazi indoor ma confermano che le pareti abitative indoor possono migliorare il comfort acustico degli spazi interni aumentando sia l'isolamento acustico che l'area di assorbimento acustico, consentendo di raggiungere i valori ottimali di tempo di riverbero previsti dalla normativa [73]. Questo è generalmente limitato agli studi di misurazione sul campo, sebbene siano stati fatti alcuni tentativi per svi-

a. Barriera antirumore intorno alla sede del Birrificio Krombacher Brauerei, (Germania), progettata dall'architetto Andreas Kiparper per impedire la diffusione del rumore emesso dalla fabbrica nell'ambiente circostante.

Fonte: https://www.bft-international.com/en/artikel/bft_The_Green_Wave_a_noise_barrier_connects_culture_with_nature_3307235.html

b. Impatto dell'area di copertura di una facciata con vegetazione sulla riduzione del rumore di un'area urbana. Nella condizione di base, l'intera facciata è ricoperta da moduli di facciata verde, nella seconda condizione solo la base, nella terza è esclusa la base e questa mostra un livello di riduzione del livello sonoro inferiore a 1 dB(A).

Fonte: ARUP, 2016 <https://www.arup.com/perspectives/cities-alive-green-building-envelope>

luppate modelli matematici per descrivere il fenomeno [74].

L'uso della vegetazione come barriera acustica è stato studiato a partire dagli anni '80 [75] ottenendo riduzioni del suono che variavano da 5 a 10 dB in funzione di vari fattori come la specie vegetale, le dimensioni la forma e la posizione degli arbusti rispetto alla fonte del rumore. Si è indagata la vibrazione di quattro diverse foglie di piante utilizzando un vibrometro laser-Doppler che ha permesso di misurare la velocità di vibrazione fogliare mostrando che le singole foglie sono in grado di convertire una piccola quantità di energia acustica in calore mediante vibrazione [76]. Negli studi successivi si riscontrano ricerche nelle quali la propagazione del suono è indagata nelle proprietà acustiche di assorbimento, isolamento e riflessione o dispersione; tra questi, si è verificato che l'apparato fogliare è in grado di assorbire una quantità importante di energia sonora, fino al 50% dell'onda sonora incidente, a seconda dei parametri morfologici della pianta e che quan-

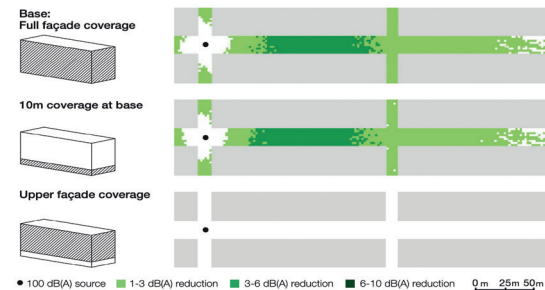


a

do l'onda sonora colpisce le piante si verifica una dissipazione causata dall'attrito termo-viscoso allo strato limite alle alte frequenze [77].

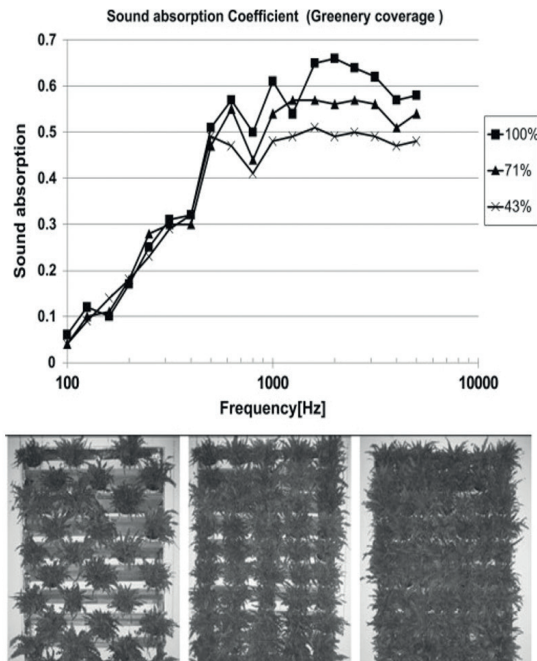
Una serie di misurazioni sono state effettuate in una camera riverberante per esaminare i coefficienti di assorbimento e dispersione di una parete verde tenendo conto di vari fattori, come la profondità e il contenuto di umidità dello strato di terra e il livello di copertura della vegetazione [78]. I risultati hanno mostrato che anche uno strato di terreno sottile con una profondità di 50 mm forniva un coefficiente di assorbimento significativo di circa 0,9 a circa 1.000 kHz e che, con l'aumento della profondità del suolo, le variazioni del coefficiente di assorbimento erano lievi (circa 0,1). È stata osservata una significativa diminuzione di circa 0,6 del coefficiente di assorbimento con un aumento del contenuto di umidità del suolo e di 0,2 all'aumentare della copertura vegetale.

Esperimenti in una camera riverberante hanno determinato le caratteristiche di assorbimento di Lomariopsidaceae, vegetazione disponibile per la semina in climi caldi e umidi. Lo studio è



b

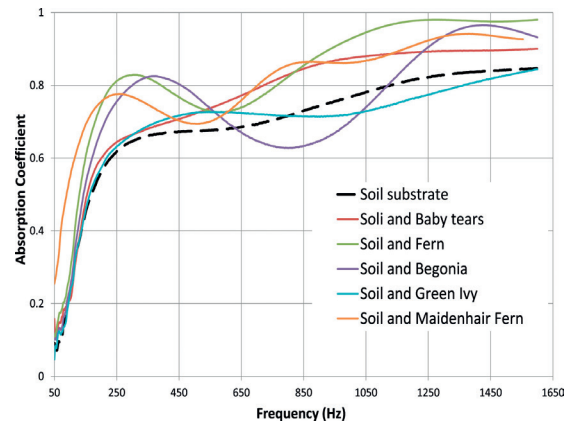
stato verificato con tre diverse impostazioni in termini di copertura del verde: 43%, 71% e 100% ed ha rivelato che l'uso della vegetazione negli ambienti tropicali potrebbe essere vantaggio in quanto all'aumentare delle frequenze e della percentuale di copertura del verde, aumenta il coefficiente di assorbimento acustico [79]. Altri hanno investigato la variazione del coefficiente di assorbimento immettendo in un ambiente confinato uno strato di parete con Felce e substrato [80]. I risultati hanno confermato che il suolo è l'assorbitore principale; tuttavia, il fogliame aiuta notevolmente nell'assorbimento quando la sua densità è elevata. La presenza della vegetazione migliora l'assorbimento di un range



Il comfort indoor nel patrimonio costruito. Tecnologie

di frequenza raggiungendo un valore di 0,75 a 300 Hz e 0,9 a 1600 Hz.

Le prestazioni di attenuazione del rumore di una parete verde in uno spazio indoor si sono testate mostrando che il livello di rumore era del 2%–8% inferiore rispetto a quello di un muro di riferimento senza vegetazione [81]. Un recente studio ha esaminato la prestazione di isolamento acustico di una parete verde, dimostrando un miglioramento acustico pari a 6 dB e una diminuzione del tempo di riverbero rispetto allo stesso involucro privo di parete verde [82], soddisfacendo il requisito di isolamento acustico previsto della legislazione italiana in riferimento, pari a $R_w \geq 50$ dB, per una parete divisoria tra diverse unità immobiliari.



a. Sistemi vegetali verticali con diversa densità di copertura e relativi coefficienti medi di assorbimento acustico.

Fonte: Wong et Al., 2010 [79]

b. Coefficienti di assorbimento misurati secondo il metodo ISO 10534-2. I risultati hanno evidenziato che il substrato selezionato ha un ruolo predominante nell'assorbimento.

Fonte: D'Alessandro, F., et. Al., 2015 [80]

I risultati ottenuti da altre analisi hanno mostrato che gli elevati valori del coefficiente di assorbimento acustico tra 250 Hz e 3800 Hz erano principalmente dovuti alla presenza del substrato di coltura poiché in condizioni substrato bagnato, le prestazioni acustiche della parete verde sono diminuite, poiché l'acqua all'interno ha fatto aumentare la densità del terriccio e ha riempito i vuoti dei pori [83, 84]. Come evidenziato da altre ricerche sono comuni le analisi sulle prestazioni di isolamento acustico delle pareti verdi con prove di laboratorio standardizzate e il loro studio ne descrive una i cui risultati principali si configurano con un indice ponderato di riduzione del suono R_w di 15 dB e un coefficiente di assorbimento acustico di 0,40 [85].

2.4 Benefici per il comfort visivo

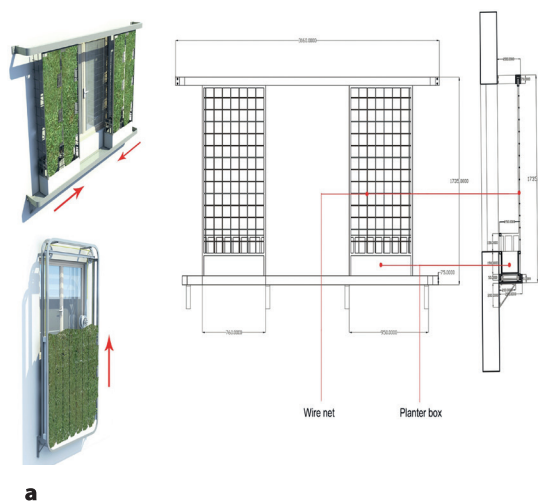
I benefici che le soluzioni nature-based negli edifici possono indurre sul comfort visivo degli occupanti dipendono da due aspetti molto diversi tra loro: il primo è l'effetto schermante e, dunque, una protezione dall'abbagliamento solare; il secondo indaga la dimensione socio-psicologia legata agli effetti rilassanti che la visione della vegetazione genera sulla mente umana. L'effetto schermante delle foglie riduce la quantità di radiazione solare in funzione dell'indice di superficie fogliare (LAI), valore direttamente proporzionale alla capacità ombreggiante.

L'apparato fogliare ha la capacità in parte di assorbire l'energia solare e utilizzarla per il processo di fotosintesi, in parte rifletterla e in mi-

sura minore lasciarla attraversare. L'effetto schermante dipende dalla tipologia di pianta ma in inverno è minore perché la copertura fogliare diminuisce. L'ombreggiatura esterna sulle finestre è una caratteristica chiave del design per il risparmio energetico [86, 87], poiché in grado di ridurre la quantità di calore che raggiunge l'interno in misura maggiore rispetto ad altri tradizionali dispositivi di ombreggiamento come tende veneziane, rivestimenti plastici o pesanti rivestimenti riflettenti su vetro. Tuttavia, la stragrande maggioranza degli studi sperimentali si concentra su sistemi a verde verticale per pareti opache senza aperture. Solo pochi studi hanno esplorato la sua applicazione per schermare le chiusure trasparenti [88, 89] ma si tratta di sistemi non mobili che ne limitano l'applicazione.

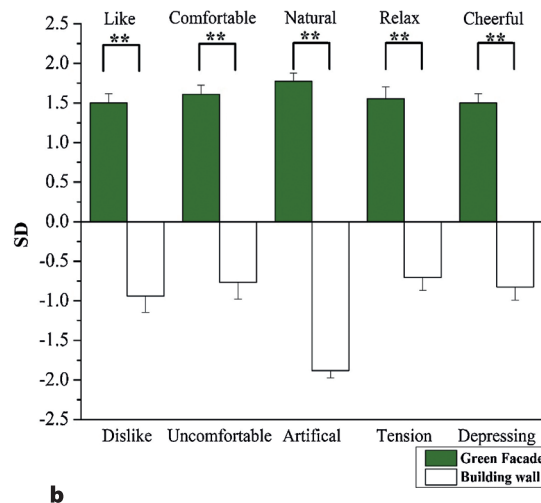
Per la progettazione delle schermature solari in genere si fa riferimento ad un coefficiente di ombreggiamento che rappresenta il rapporto tra radiazione solare ricevuta e trasmessa, ma nel caso dei sistemi verdi verticali non è possibile standardizzare un valore a causa della forma a crescita libera delle foglie. Ciò nonostante, alcuni studi hanno formulato delle ipotesi su tale valore [90, 91], tra questi uno ha assunto un valore di coefficiente di ombreggiamento di una copertura vegetale pari a 0,041 e con una riduzione dei parametri termici di un edificio vetrato pari al 40,68% [92]. La radiazione solare davanti e dietro la schermatura verde è stata misurata da piranometri (sensori di flusso solare) durante il ciclo biologico di un intero anno.

Uno studio ha restituito un coefficiente di correlazione tra il consumo di energia di raf-



freddamento e la radiazione solare ambientale ridotto da 0,94 a 0,61 grazie all'ombreggiatura di una parete verde e tra il consumo di energia di raffreddamento e la differenza di temperatura dell'aria interna-esterna da 0,92 a 0,79 [93]. Il coefficiente di ombreggiamento è stato misurato mediante celle fotovoltaiche, stabilendo la correlazione tra il tasso di copertura e il coefficiente di ombreggiamento medio superficiale. I risultati hanno mostrato che quando il tasso di copertura era all'80%, il coefficiente di ombreggiatura era 0,28.

Alcune ricerche inerenti alla bioedilizia pongono in relazione l'osservazione di un ambiente verde e la caratterizzazione di un ambiente rilassante [95, 96, 97] che può favorire anche un aumento della produttività negli ambiti lavorativi. Gli studi in merito interessano soprattutto le discipline sociali e psicologiche che analizzano come la visione della vegetazione può influenzare la salute emotiva. Analisi alla base



a. Studio sperimentale per il risparmio energetico in estate mediante l'uso di sistemi a verde verticale mobili per la schermatura delle finestre.

Fonte: Zheng, X., et. Al., 2020 [93]

b. Confronto di sentimenti soggettivi secondo il metodo semantico differenziale dopo aver visto una facciata verde o un muro di un edificio. I valori positivi sono sopra lo 0.

Fonte: Elsadek, M., et. Al., 2019 [94]

dell'architettura biofila, nella quale gli spazi sono progettati per sviluppare la percezione sensoriale e instaurare un dialogo diretto tra l'uomo e il mondo vegetale, la luce e i materiali naturali. Studi sulla comunità abitante di aree residenziali urbane riqualificate con l'aggiunta di spazi verdi restituiscono un aumento del benessere degli occupanti e un conseguente comportamento più civile e stimolante [98].

2.5 Soluzioni tecnologiche

Il comportamento prestazionale delle soluzioni nature-based non è mai univoco: oltre l'influenza del clima e dell'orientamento di esposizione, gran parte delle variabili dipendono dalle tecnologie, dalla progettazione del sistema e dei componenti della struttura, del sistema di irrigazione e fertilizzazione, della tipologia delle piante e del substrato. Le tecnologie che sviluppano soluzio-

ni nature-based rientrano nell'accezione di "Green Infrastructures" considerata a livello mondiale un approccio innovativo alla gestione delle aree naturali che fornisce un'ampia gamma di servizi ecosistemici al fine di proteggere la biodiversità in contesti sia rurali che urbani. Analizzando le strategie inerenti sviluppate in vari paesi ("Sviluppo a basso impatto" negli Stati Uniti, "Green Infrastructure" in Europa e "Sponge City" in Cina), le tecnologie GI possono essere raggruppate in quattro categorie principali: (1) chioma arborea (TC), (2) spazi verdi aperti (GOS), (3) tetti verdi (GR) e (4) sistemi di vegetazione verticale (VGS) [99]. Nella presente analisi ci si focalizzerà sui sistemi tecnologici che maggiormente si relazionano con il comfort indoor e che necessitano di particolari riflessioni sulle modalità di integrazione negli edifici esistenti: GR e VGS.

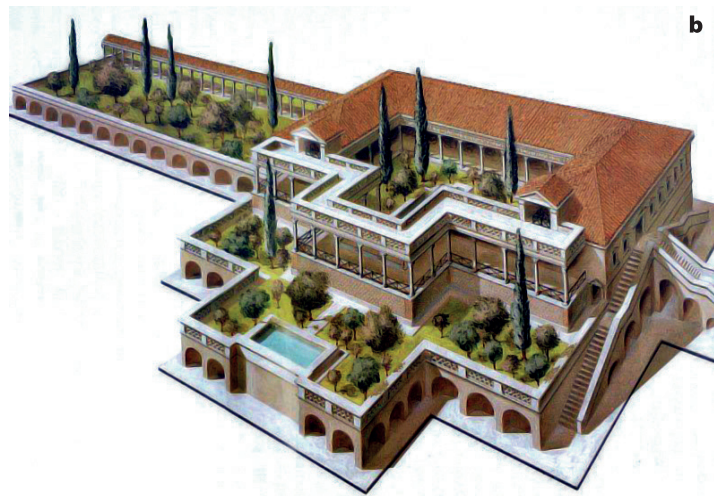
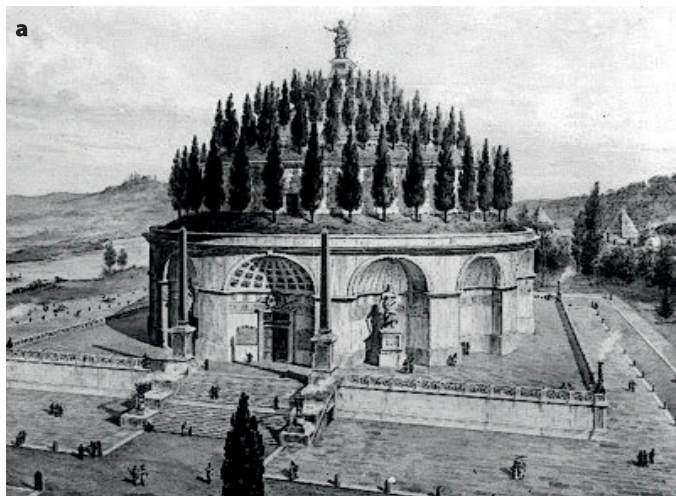
Le soluzioni tecnologiche nature-based per gli edifici si riferiscono, infatti, all'applicazione su facciate, coperture e pareti interne di sistemi integrati (BIV-Building Integrated Vegetation), con l'eventuale aggiunta di sistemi finalizzati al miglioramento delle prestazioni dell'involucro edilizio: rivestimenti termici, sistemi ventilati, impiantistica di vario genere (smaltimento acque meteoriche, fitodepurazione, ecc.). Sebbene le soluzioni integrate siano la risposta alle più innovative ricerche e siano costante oggetto di studio in realtà basta guardare al passato per comprenderne il funzionamento, l'adattamento negli edifici e le possibilità d'uso della vegetazione.

Si annoverano esempi che fin dall'antichità ricordano arcaiche pareti verdi consistenti in piante rampicanti e giardini pensili (Giardini pensili di Babilonia 590 a.C.). L'architettura del

passato ha spesso incardinato tra le tecniche costruttive tradizionali l'uso della vegetazione nelle coperture e giardini accostati a specchi d'acqua per favorire il raffrescamento. All'epoca romana risalgono diverse realizzazioni di verde pensile: si ricorda il mausoleo di Augusto (29 a.C.) in cui la copertura era in origine ricoperta di terra e inverdita con cipressi; la villa dell'imperatore Adriano a Tivoli e le ville di Plinio il Giovane (I secolo d.C.) con giardini pensili costituiti da tumuli in terra in pendenza, in cui l'inclinazione assicurava l'allontanamento delle acque piovane. In epoca medioevale il verde pensile fu impiegato negli edifici ecclesiastici per consentire la coltivazione nei chiostri, nei castelli e fortezze come accumuli di terra ricoperta dalla vegetazione per attutire gli effetti dei colpi d'arma da fuoco e rivestire le porzioni di elementi danneggiati.

La prima definizione di tetto verde in architettura è ascrivibile al 1865, anno in cui C. Von Rabitz (1823-1891) teorizzò l'argomento, nel suo trattato sui giardini pensili, evidenziandone per la prima volta il contributo alla salubrità nei contesti a forte densità abitativa. Soluzione utile a contrastare l'eccessivo inquinamento legato alla trasformazione delle città in conseguenza della rapida espansione industriale. Dalle emergenti riflessioni sui temi dell'ecologia e della salvaguardia ambientale crebbe la necessità d'individuare soluzioni che permettessero la mitigazione ambientale e una miglior compensazione urbana [100].

Da questa necessità il verde pensile è utilizzato come elemento di riequilibrio tra l'uomo e l'ambiente, tanto Le Corbusier (1887-1965) ne fa uno dei cinque punti della Nuova Architettura.



tura (*Vers une Architecture*, 1923), il *Toit Terrasse*. Lo spazio urbano viene arricchito di parchi estesi al centro dei quartieri e giardini pensili sulle coperture degli edifici. Il progetto delle *Immeubles Villas* (1922) che riprende i caratteri delle *Unité d'Habitation* e l'edificio del *Mill Owners' Association* situato a Ahmedabad in India sono caratterizzati da terrazzi giardino. Nella prima parte del XX secolo anche altri noti architetti riconsiderano gli spazi in copertura progettati a verde, si ricordano i progetti di Sven Markelius (1889-1972) in Svezia, di Alvar Aalto (1898-1976) in Finlandia e di Frank Lloyd Wright (1867-1959) negli Stati Uniti. Una dei maggiori proponenti dell'integrazione della vegetazione in architettura nel secolo scorso è l'architetto Lina Bo Bardi (1914-1992), la quale sperimenta nuove tecniche di interazione tra natura-architettura in diversi edifici d'uso domestico. Esempio di architettura organica è *Chame-Chame House* a Salvador de Bahía (1964) totalmente

arricchita di superficie inverdite con vegetazione tropicale, architettura pioniera delle chiusure verticali con pareti verdi.

Oggi sono sempre più apprezzati i benefici che soluzioni nature-based apportano per l'uomo e per l'ambiente, rappresentando un rilevante elemento di resilienza urbana. È costante la ricerca finalizzata all'ottenimento di soluzioni sempre più prestanti per l'ottimizzazione del comfort umano, della salubrità dell'edificio e del comportamento energetico globale dell'edificio al fine di un maggiore contenimento dell'uso degli impianti.

Le attuali pareti verdi constano in un'evoluzione del sistema verde, *Mur Vegetal*, brevettato negli anni 60 dal botanico e ricercatore Patrick Blanc e impiegato frequentemente nei Paesi del nord e centro Europa come strategia per il recupero di edifici industriali in stato di abbandono. Tipologia di parete verde costituita da un apparato vegetale a ricoprimento di specifiche sotto-

a. Riproduzione del Mausoleo di Augusto
Fonte: <https://www.romanoimpero.com/2010/01/mausoleo-di-augusto.html>

b. Riproduzione secondo le indicazioni di Vitruvio della villa romana di Plinio il Giovane
Fonte: <https://tuttatoscana.net/ultra-limites/la-villa-di-plinio-il-giovane-in-etruria/>

a. Mill Owners' Association Building a Ahmedabad, India
Fonte: <https://www.archdaily.com>

b. Chame-Chame House a Salvador de Bahia
Fonte: <https://www.archdaily.com>



a

strutture di sostegno ancorate al paramento murario. L'apparato vegetale può essere costituito da specie vegetali diverse che convivono nella stessa installazione parietale purché a portamento decombente (piegato verso il basso) [101]. Il sistema dispone di quattro strati funzionali che, dall'esterno verso l'interno, possono essere così raggruppati: strato vegetale; substrato colturale; impermeabilizzazione e protezione dall'azione delle radici; sottosistema di supporto. Il Mur Vegetal ha rappresenta un punto cardine dell'innovazione tecnologica poiché volto ad integrare la vegetazione con componenti che possono anche essere ottenuti attraverso una serializzazione di tipo industriale, pur comunque necessitando di una progettazione che adegui il sistema al contesto di riferimento.

2.5.1 Sistemi di vegetazione orizzontale integrata

Le coperture verdi sono installazioni vegetali differenti per tipologia, caratteristiche botaniche ed ecologiche [100], eseguite sull'elemento di



b

chiusura orizzontale superiore di un edificio a superficie piana o inclinata. In base alla composizione di tetto verde variano le prestazioni che tale elemento può garantire; in genere si individuano oltre alle capacità già descritte di miglioramento della qualità dell'aria e apporto termico refrigerante, quelle di isolamento e di diminuzione del deflusso delle acque piovane.

La norma UNI 11235:2015 [102] definisce i criteri di progettazione, esecuzione, controllo e manutenzione di coperture continue a verde, in funzione delle particolari situazioni di contesto climatico, di contesto edilizio e di destinazione d'impiego e individua una classificazione dei tetti verdi in intensivi, semi-intensivi ed estensivi a seconda del tipo di vegetazione, degli spessori del substrato colturale, del peso, della manutenzione, dei costi e dei materiali e impianti impiegati.

I tetti verdi intensivi sono giardini pensili progettati con una profondità del substrato superiore a 15–20 cm e profondo fino a 4,5 metri che permette l'impianto di un'ampia varietà di specie vegetali, simile ai paesaggi a livello del



a

suolo: specie erbacee (sedum tra i più utilizzati), piante perenni, arbustive ed arboree. Tale tipologia ha un'elevata capacità di ritenzione idrica (oltre il 50%) e richiede una sottostruttura portante robusta poiché il peso gravante sulla struttura varia tra i 180–500 kg/m² in funzione della tipologia di inverdimento previsto [103]. Gli strati costitutivi possono essere posti in opera solo se la pendenza è inferiore a 10° a causa della maggiore profondità del substrato. In termini di gestione, la biodiversità caratterizzata da strati colturali di tipo organico richiede una manutenzione periodica, sotto forma di concimazione, diserbo e irrigazione. In relazione allo smaltimento delle acque piovane è ridotto il deflusso dell'85% rispetto ai tetti tradizionali ma devono essere utilizzati dei sistemi di drenaggio e irrigazione, aumentando la complessità tecnica e i costi associati [104]. Infine, lo spessore dello strato colturale e dello strato drenante potrebbero soddisfare l'isolamento termico richiesto senza prevedere l'impiego di uno strato aggiuntivo.



b

I tetti con vegetazione di tipo semi-intensivo o intensivo leggero presentano uno spessore del substrato di coltivazione al limite fra l'estensivo e l'intensivo che varia tra i 15-20 cm per un peso complessivo tra 150-200 kg/m² [105]. La copertura vegetazionale è generalmente a tappeto erboso (comunemente graminacee) e richiede una manutenzione più contenuta rispetto ad un tetto verde intensivo ma comunque frequente e con costante irrigazione. Rispetto alla tipologia intensiva la stratigrafia prevede uno strato d'isolamento termico.

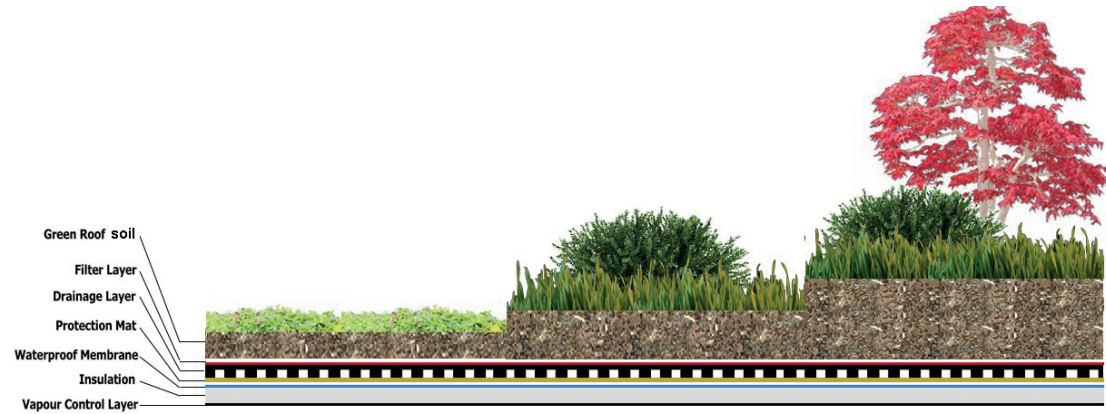
Le coperture verdi di tipo estensivo sono le più diffuse perché caratterizzate da una minore profondità del substrato di substrato (< 15 cm) e per il basso costo di realizzazione in quanto richiedono un supporto strutturale minimo grazie al contenuto peso al m² [106]. I tetti estensivi presentano specie vegetali capaci di svilupparsi e adattarsi alle condizioni ambientali in cui vengono a trovarsi (erbe, muschi, sedum e alcune piante grasse), con livelli di manutenzione e fabbisogno idrico minimi. Le specie

a. Facciata verde del museo Quai Branly a Parigi progettata da Patrick Blanc

Fonte: <https://www.inexhibit.com/it/case-studies/4-musei-e-una-parete-urbana-i-giardini-verticali-di-patrick-blanc/>

b. Muro vegetale Oasis d'Aboukir, a Parigi progettato da Patrick Blanc
Fonte: <https://www.teknoring.com/news/green-building/loasis-da-boukir-il-nuovo-capo-lavoro-verde-di-patrick-blanc/>

Classificazione dei sistemi di tetti verdi in relazione all'uso, ai fattori di costruzione, alle esigenze di manutenzione.
 Fonte: <https://medium.com/an-idea/4-things-you-need-to-know-about-green-roofs-42ef280c831b>



	Extensive Vegetated Roof	Semi-intensive Vegetated Roof	Intensive Vegetated Roof
Soil Depth:	3-6 in.	6-10 in.	10 in. and more
Weight:	13-30 PSF	24-40 PSF	35- 100+ PSF (up to 150 PSF)
Type of Plants:	Mosses, sedums, and grasses	Grasses, herbs, and shrubs	Lawn, perennials, shrub, and small trees.
Cost:	Low initial cost \$10-\$20/SF	Medium to High initial cost \$15-\$20/SF	High initial cost \$15-\$25/SF
Maintenance:	Low	Periodically	Regularly
Irrigation:	No	Periodically	Regularly
Function:	-Ecological protection layer -More suitable for large area -More suitable for retrofit projects	-Designed green roof -More suitable for plant diversity -More suitable for design-oriented layout	-Park-like garden -Best insulation properties and water runoff/retention. -Suitable for accessible rooftop -Larger range of plant diversity

vegetali impiegate per l'inverdimento estensivo sono quindi caratterizzate da un'elevata capacità di insediamento, efficienza di riproduzione, resistenza agli stress idrici e termici a cui sono sottoposte nell'arco di un intero anno. Non sono applicabili specie vegetali arboree a causa del ridotto spessore dello strato colturale (5÷15 cm) e della possibile geometria inclinata della copertura.

Come la copertura intensiva leggera, è molto probabile che il tetto estensivo necessiti di uno specifico strato di isolamento termico in aggiunta alla prestazione offerta dallo strato colturale. Il tetto estensivo, inoltre, può essere

installato anche in pendenza ed essendo la posa in opera meno complessa rispetto alle altre sopradescritte tipologie rappresenta, in genere, la scelta per coprire estese superfici. Essendo il substrato culturale di minore spessore, l'assorbimento delle acque piovane è più contenuto e dunque è utile prevederne un deflusso.

I tetti verdi sono un approccio efficace per la riduzione dell'energia e del carbonio attraverso l'aumento del valore di massa e della resistenza termica e per il raffrescamento generato dell'evapotraspirazione in cui il calore solare può essere ridotto dalle foglie, assorbito in calore latente, con conseguente riduzione

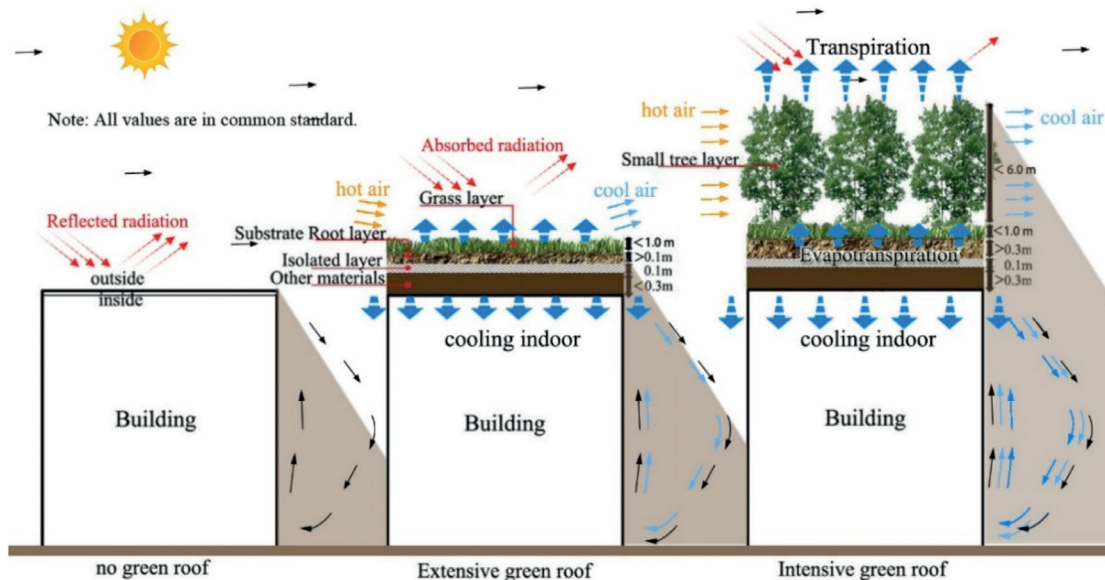
delle temperature superficiali e minore radiazione a onde lunghe emessa [107]. Le prestazioni di raffreddamento del tetto verde variano a seconda della tipologia: alcuni studi di comparazione delle tre tipologie a parità di clima, hanno evidenziato che la copertura intensiva ha migliori prestazioni di raffreddamento con una capacità di riduzione della temperatura dell'aria fino a 0,5-1,7 °C, rispetto agli 0,4-0,7 °C ridotti del tetto estensivo [108, 109].

La norma UNI 11235:2015 identifica gli elementi che possono comporre una stratigrafia generale e ne vengono definiti i requisiti minimi. Dall'interno all'esterno gli strati primari o fondamentali sono i seguenti: struttura del solaio; isolante acustico; isolante termico; membrana impermeabile con agente anti-radici; strato di accumulo e drenaggio dell'acqua; tes-

suto filtrante; substrato di crescita; vegetazione. Altri strati secondari o complementari sono: strato di ripartizione dei carichi; strato di pendenza; barriera al vapore; intercapedine di ventilazione. Gli strati funzionali o accessori: strato di compartimentazione antincendio; sistemi di drenaggio e ispezione; sistemi di irrigazione; sistemi di trattenimento delle acque; sistemi di ancoraggio della vegetazione.

Il requisito di tenuta all'acqua è garantito da uno specifico strato funzionale (membrane flessibili bituminose caratterizzate da un polimero elastomerico o plastomerico miscelato con bitume) che garantisce l'impermeabilizzazione ed è collocato immediatamente sopra allo strato di isolamento termico verso l'estradosso della copertura.

Rispetto a una copertura tradizionale, la vegetazione e il substrato proteggono il solaio



Schema di un tetto verde estensivo e un tetto verde intensivo e relativo meccanismo di raffreddamento durante il giorno.
Fonte: Zhang, G., et. Al., 2019 [103]

contro i raggi UV e gli sbalzi di temperatura. Si potrebbe però presentare il problema dell'esposizione agli agenti biologici e chimici; per evitarlo è necessario prevedere una barriera antiradice che protegga gli strati sottostanti, tra i quali la membrana impermeabile, che le radici vegetative potrebbero disgregare meccanicamente e alterare chimicamente provocando infiltrazioni d'acqua nell'edificio. La membrana antiradice deve resistere ai microrganismi contenuti nel terreno, aggiungendo alla sua composizione chimica alcuni ingredienti repellenti. Inoltre, è buona norma prevedere un ulteriore strato (in genere in geogriglie, geotessili o polistirene) che separi le membrane impermeabilizzanti e antiradice dal substrato culturale.

Un altro elemento che caratterizza le coperture verdi è lo strato di drenaggio utile ad eliminare l'acqua in eccesso accumulata nel substrato e consentire, allo stesso tempo, un'adeguata ventilazione alle radici. È caratterizzato da materiali granulari porosi (pozzolana, pomice, lapilli, argilla espansa, perlite espansa, ardesia espansa e pietrisco) o pannelli modulari in materiali sintetici ad alta resistenza con cavità per lo stoccaggio ed eliminazione dell'acqua [106]. Infine, uno strato filtrante permeabile all'acqua, costituito da materiali granulari o geotessili non tessuti, separa il substrato dallo strato drenante evitando che particelle più piccole (fini detriti di substrato e vegetazione) possano ostruire lo strato drenante.

Il substrato deve essere accuratamente scelto in modo da garantire, in funzione delle condizioni climatiche, l'insediamento e la stabilità della pianta, mantenendone nel tempo le con-

dizioni fisiche, chimiche e biologiche. Il substrato è costituito da materiali inorganici a bassa densità (pomice, zeolite, scoria, vermiculite, perlite, torba e pietrisco) con granulometria compresa tra 2-4 mm e dovrebbe includere componenti organici in quanto nutrienti della vegetazione.

La miscela di substrato influisce sulle specie vegetali in termini di pH e salinità e dunque la scelta di entrambi è da eseguirsi contestualmente. Per i tetti verdi estensivi le specie vegetali più comuni sono sedum, muschi e licheni; per i tetti intensivi leggeri si prediligono prati e fiori selvatici, piante perenni, graminacee; per i tetti intensivi sono usuali, ad esempio, piante perenni basse o medie, piante annuali provenienti da habitat asciutti, fiori di campo e sottoarbusti resistenti [110].

Una particolare tipologia di tetto estensivo è il tetto verde per la biodiversità: copertura con uno stato vegetale che ricrea uno specifico habitat con erbe autoctone e in grado di favorire una colonizzazione spontanea. Lo spessore del substrato è variabile (da 10 a 15 cm) e si compone di miscele commerciali di aggregati leggeri a varia granulometria (laterizio frantumato, materiali vulcanici quali lapillo, pomice, zeolite, etc.) e sostanza organica (di origine vegetale quale torba, compost, etc.). Per sostenere una maggiore diversità floristica e ospitare determinate specie animali, alcuni substrati si compongono anche di sabbia silicea, argilla, limo. Altri elementi supplementari sono pietre varie, tronchi e rami di alberi che costituiscono un riparo dagli agenti atmosferici per la macro e microfauna che potrebbe trovare spazi idonei



a



b

alla nidificazione in un ambiente urbano [110]. La vegetazione è sempre autoctona, tra le più comuni il sedum, muschi e poche graminacee o altre specie erbacee. L'idea è quella di lasciare spazio alla vegetazione spontanea e intervenire minimamente; dunque, la manutenzione dell'apparato vegetativo è appositamente irrilevante (una volta l'anno), quella tecnica, relativa a eventuali impianti presenti, è sempre periodica. (Catalano).

Tra le coperture verdi più innovative nelle aree urbane è quella blu-verde, corrente oggetto di studio di Enti di ricerca in varie parti del mondo, tra le quali in Italia l'Università IUAV di Venezia, l'Università di Padova insieme a una rete di Imprese coordinate dall'azienda DAKU. Il tetto blu-verde è un'infrastruttura tecnologica finalizzata a regimazione idrica e raffrescamento passivo dell'edificio. La prima funzione avviene attraverso la creazione di un'intercapedine

in copertura che riesce a contenere anche le precipitazioni più consistenti; in secondo luogo, l'acqua trattenuta viene accumulata e riutilizzata per irrigare la vegetazione e quindi poi traspirata da quest'ultima con l'effetto di raffrescare l'edificio. Il bacino di raccolta costituisce, peraltro, una riserva idrica per i periodi di scarsità di acqua e quando trattiene al suo interno grandi quantità di acqua, le performance di isolamento termico della copertura, soprattutto in regime estivo aumentano. I prototipi sviluppati per studiare il funzionamento della soluzione confermano che in estate la presenza di acqua in copertura garantisce un abbassamento fino a 20°C in più rispetto ad una copertura standard priva di vegetazione [111], dimostrando una notevole efficacia nel contrastare gli effetti delle isole di calore urbano. È usuale che il sistema sia gestito in maniera automatica mediante un software che attivi dei

a. Stratigrafia di un tetto verde estensivo.

Fonte: Vijayaraghavan, K., 2016 [106]

b. Tetto intensivo della California Academy of Sciences, San Francisco, progetto dell'Architetto Renzo Piano insieme agli esperti paesaggisti Paul Kephart e Kurt Horvath. La copertura fornisce un eccellente isolamento termico, cattura il 100% dell'acqua piovana e trasforma l'anidride carbonica in ossigeno.

Fonte: <http://www.green-roofs.com/projects/california-academy-of-sciences-cas-living-roof/>

a. Tetto verde biodiverso.
Fonte: <https://zinco.ch/it/systeme/biodiversitaetsdach>

b. Stratigrafia di un tetto blu-verde.
Fonte: <https://www.icbprojects.co.uk/solutions/green-roof-systems/blue-roof-systems>



a

sensori e pompe per un'irrigazione regolare e un controllo dello stato di pieno della vasca di accumulo. Sono in divenire le ricerche che esaminano le prestazioni idrologiche del tetto blu-verde e alcune hanno già mostrato esiti positivi sulla riduzione del deflusso superficiale e degli effetti dell'evapotraspirazione dell'apparato vegetale nell'abbassamento della temperatura superficiale dell'intradosso del solaio di copertura, risultando fino 4 °C più fredda rispetto ad un generico tetto verde estensivo [112].

2.5.2 Sistemi di vegetazione verticale integrata

I sistemi di vegetazione verticale integrata sono pareti ricoperte in modo totale o parziale da un apparato vegetale e dal substrato culturale.

Nonostante negli ultimi anni si sia assistito ad un interesse generale su tale tecnologia, in particolare in riferimento a un suo compatibile uso per interventi di recupero dell'edificato esistente, è assente un riferimento normativo mirato, a differenza, come si è visto precedentemente, dei sistemi di vegetazione orizzontali



b

integrati negli edifici. La consapevolezza tecnologica deriva da un insieme di esperienze e sperimentazioni sul campo acquisite nel corso degli anni che hanno portato oggi ad un'ampia scelta di soluzioni volte a migliorare le prestazioni dell'involucro edilizio.

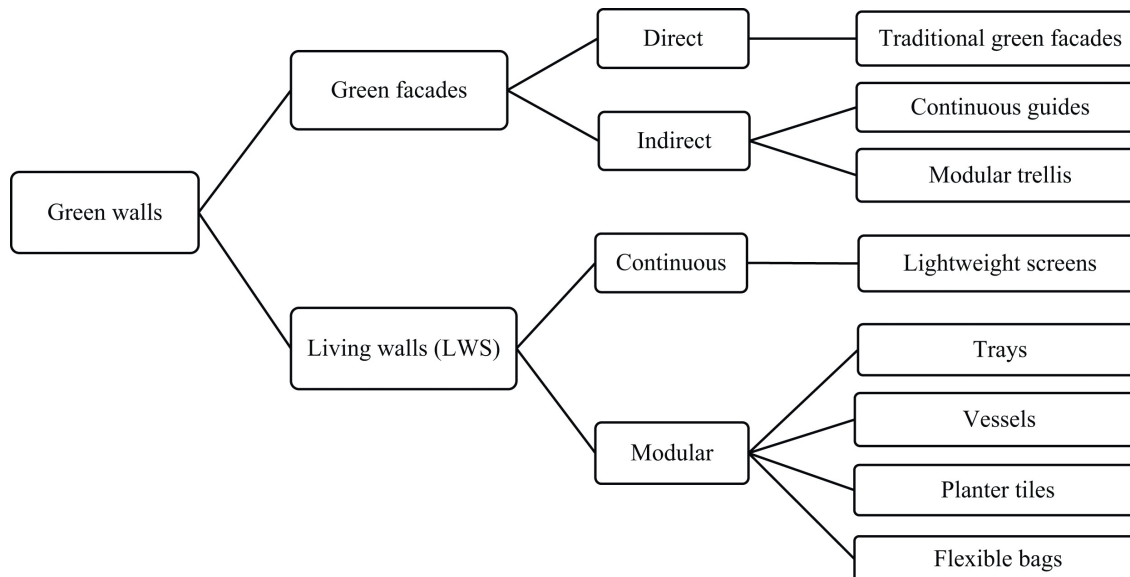
I sistemi di vegetazione verticale integrata possono essere, rispetto ad un edificio, poste sul lato esterno del paramento perimetrale o sul lato interno o, ancora, fungere da elemento divisorio autoportante o ancorate ad una parete esistente. I supporti autoportanti sono pareti viventi leggere, flessibili e mobili. Se installate all'interno possono fungere da parete divisoria, frequentemente progettata per l'abbellimento di interni poiché dotate di molti vantaggi inclini alla progettazione biofila. Le pareti viventi autoportanti più comuni sono progettate con la tecnologia idroponica che conserva il 75% in più di acqua rispetto alle piante coltivate nel terreno; i sistemi più innovativi prevedono un impianto di auto-irrigazione che include sensori di umidità [113]. Per coltura idroponica s'intende una tecnica di coltivazione in assenza

di suolo in cui la crescita della pianta avviene mediante un approvvigionamento di una soluzione a base di acqua ed elementi nutritivi disciolti in essa.

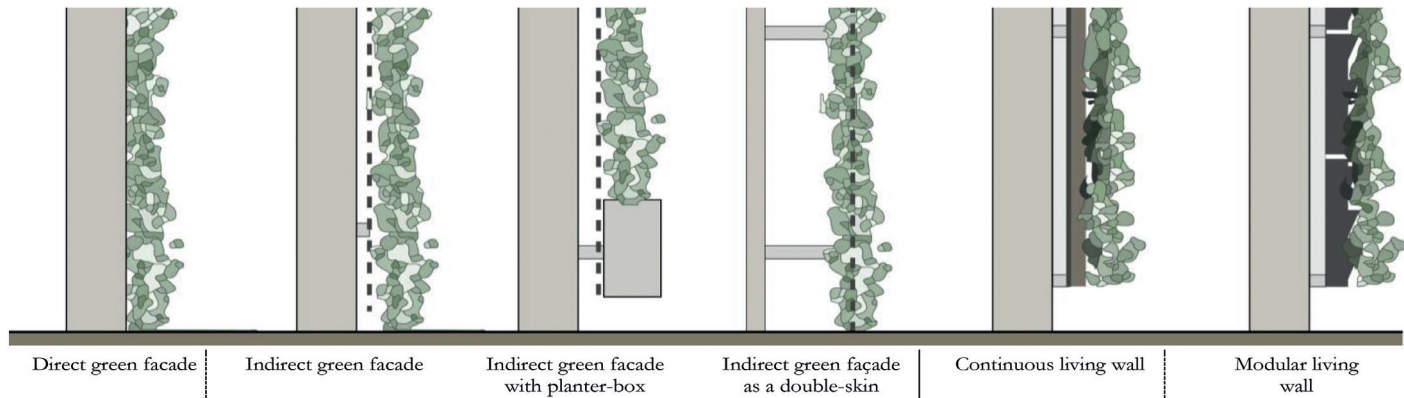
Gli studi dell'ultimo decennio identificano i sistemi di inverdimento verticale per l'architettura urbana classificandoli in base alla condizione che il sistema di copertura vegetale sia sovrapposto all'involucro architettonico o che si integri con esso pur avendo un supporto indipendente nel suolo [114]. Nel primo caso ci si riferisce ai muri viventi o pareti verdi, nel secondo alle facciate verdi. I muri viventi sono costituiti da piante che non radicano nel terreno ma in pannelli modulari che contengono terra o altri substrati di coltivazione artificiale [115]; le facciate verdi, invece, si ottengono per mezzo della crescita di piante rampicanti che

hanno radicato nel terreno adiacente il paramento murario. Quest'ultimo caso potrebbe comunque richiedere opportuni sostegni affinché la vegetazione si sviluppi nel senso verticale e garantire una più ampia copertura. A loro volta entrambi i sistemi parete verde e muri viventi presentano varie soluzioni costruttive che dipendono dalla struttura di supporto e dalle differenze di quest'ultima nella sua composizione, dimensione e assemblaggio.

Entrambi i sistemi sono costituiti da elementi fissi e variabili che vengono determinati in base alla complessità del progetto. I componenti primari sono elementi di supporto, di assorbimento d'acqua, elementi di ritenzione, substrati di coltura, vegetazione e sistemi di irrigazione e fertilizzazione. Inoltre, in entrambi i casi la vegetazione



Classificazione dei sistemi di vegetazione verticale in base alle tecnologie costruttive.
Fonte: Manso, M., Castro-Gomes, J., 2015 [116]



Categorie di inverdimento verticale integrato nell'involucro edilizio.
Fonte: Gunawardena, K., & Steemers, K., 2019 [115]

può essere precoltivata così da coprire interamente il supporto già al momento del suo montaggio.

Le facciate verdi si basano sulla posa di piante rampicanti che possono coprire la superficie della facciata crescendo verso l'alto o, se appese sul paramento, a cascata verso il basso. Si distinguono le facciate verdi dirette o indirette a seconda se le piante siano direttamente ancorate al paramento o se si sostengono su un supporto fissato ad esso. Le facciate verdi tradizionali sono un sistema di inverdimento diretto, consistente nell'utilizzo di rampicanti autoadesivi, radicati direttamente nel terreno [116]. Nei sistemi di inverdimento indiretto le piante possono essere radicate direttamente nel terreno o in fioriere, ed essere guidate a svilupparsi lungo una struttura di supporto continua o modulare [116]. Nel caso di supporto continuo la pianta si sviluppa su un'unica struttura costituita da cavi in tensione, maglie e reti (per lo più in acciaio o materiali sintetici fibrorinforzati); in

quello modulare vi sono dei pannelli reticolari o elementi stampati in moduli e assemblabili in diverse configurazioni sui quali radicano le piante. Le soluzioni con tiranti metallici o con reti in fibra sintetica rappresentano le più semplici per l'applicazione delle specie rampicanti agli involucri edilizi, ma anche le meno versatili, dal momento che il sistema si adatta alla forma ed entità della parete esistente. Trattandosi di un sistema a ridosso del paramento murario, comporta la necessità di ricorrere a tecnologie di ancoraggio invasivo, il cui impiego richiede un'attenta valutazione in termini di conservazione dell'esistente. Le strutture di sostegno rigide conferiscono la possibilità d'uso di componenti che, seppur sempre ancorati al paramento esistente, poggiando sul suolo risultano indipendenti rispetto alla parete senza sollecitarla in relazione al carico del peso proprio e del manto vegetale.

I muri viventi sono ricoperti da piante che

radicano in elementi modulari sospesi sulla superficie muraria. Essi, sia per la possibilità di essere installati prevedendo un'intercapedine ventilata che per la possibilità di accogliere una varietà di specie vegetali, mostrano un alto tasso di rimozione degli inquinanti, in particolare COV e un'elevata portata d'aria rispetto alle facciate verdi, a fronte di un costo maggiore e un sistema di supporto più complesso rispetto quest'ultime.

Rispetto alle facciate verdi la crescita della vegetazione è più veloce e uniforme poiché vi è un numero maggiore di varietà di piante che si sviluppano allo stesso tempo e, inoltre, con tale sistema si riescono a coprire aree più elevate. Le pareti verdi con strutture di sostegno verticale che possono essere fissate alla facciata di un edificio presentano diverse configurazioni: con semplice supporto verticale continuo o con più complessi sistemi modulari, disponibili in dimensioni varie [117]. Per la loro caratteristica di leggerezza e permeabilità, con la possibilità di inserire singolarmente ogni pianta in ogni nodo del supporto, i muri viventi continui sono



noti nell'architettura contemporanea; tra gli esempi più conosciuti si può annoverare il Mur Vegetal progettato dal botanico francese Patrick Blanc. La particolarità del sistema risiede nel fatto che lo strato vegetale si può comporre di una molteplicità di circa 300 specie diverse (generalmente epifite: felci, muschi, ecc.) raggiungendo fino a 25-30 piante per metro quadrato [101].

Il substrato colturale dei muri viventi continui è composto da un doppio strato di feltro inorganico in poliammide sintetica nel quale vengono ricavate delle sacche per l'innesto delle specie vegetali che si radicano aggrappandosi alla superficie del feltro fino ad attraversarlo completamente. Il substrato viene più volte al giorno irrigato da un impianto automatizzato di fertirrigazione. All'estremità inferiore del muro vegetale è sempre presente un sistema di drenaggio dell'acqua costituito da materiale inerte che incanala il liquido in eccesso non trattenuto dal substrato e mediante un apposito impianto di redistribuzione potrebbe incanalarla nuovamente per l'irrigazione oppure

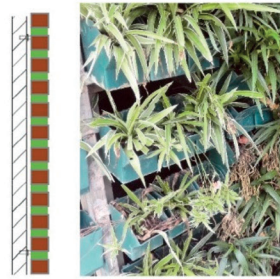


Facciata verde in un complesso residenziale, situato nel centro di Singapore. La facciata verde è composta da piante rampicanti e una rete metallica.

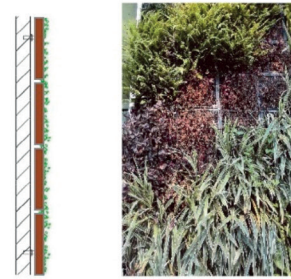
Fonte: <https://sksteeltw.com/case-study/green-facade/>

Esempi di alcune tipologie di muri viventi (a) e facciate verdi (b).

Fonte: Lin, H., et. Al., 2019 [117]



a1. Soil container system

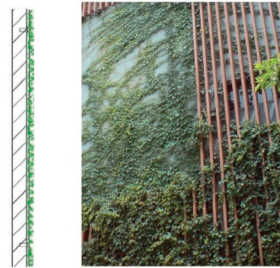


a2. Substrate module system



a3. Felt system

Green facades



b1. Direct green façade



b2. Indirect green façade



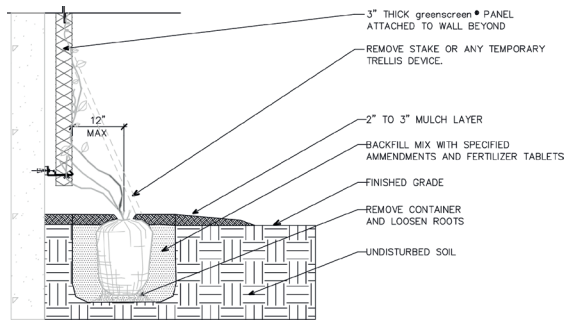
b3. Indirect green façade at a transitional space

convogliata verso il sistema di smaltimento fognario.

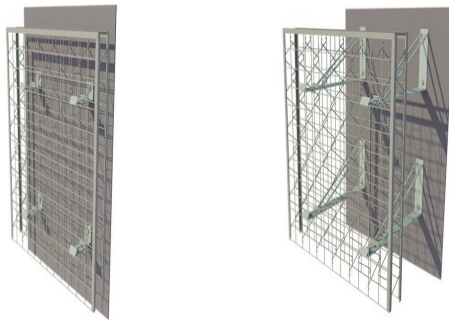
I sistemi modulari sono sospesi alla parete attraverso diverse strutture di supporto e per la loro adattabilità e rapidità di posa in opera sono i sistemi più diffusi per integrare la vegetazione negli involucri edilizi; le soluzioni variano per composizione, forma, dimensioni, tipo di substrato, numero e tipo di piante per modulo e materiale di supporto. I muri viventi modulari si realizzano mediante elementi di specifiche dimensioni che possono essere direttamente fissati alla parete o sospesi ad essa attraverso una struttura di supporto [118]. In questo ultimo

caso vi sono sistemi modulari a traliccio e i sistemi a cavo/fune; entrambi con la possibilità di essere montati a parete, autoportanti o utilizzati come colonne; i sistemi di cavi/fune hanno in più la possibilità di coprire lunghe distanze. I moduli ancorati alla struttura di supporto sono costituiti da contenitori in acciaio inox, geotessili, sistemi di irrigazione, substrato di coltura e vegetazione e possono essere di varia forma: vassoi, vasi, fioriere o borse flessibili [119].

Al variare della tipologia di substrato di coltura sono indicati determinati supporti di crescita: nel caso, ad esempio, di terreno sciolto si possono utilizzare sistemi di tipo “soil-on-a-shelf”



a



d

o “soil-in-a-bag” ovvero il terreno può trovarsi imballato in uno scaffale o in una borsa fissati sul muro [119]. I terreni sciolti sono costituiti da elementi a grana grossolana, tra i quali sabbia e sono alquanto permeabili all’aria e all’acqua e quindi, poiché si imbibirebbero troppo, il loro uso non è consigliabile in contesti climatici piovosi e ventosi.

Esiste un’altra tipologia di supporto di crescita che però non prevede terreno colturale: è un supporto costituito da un filtro geotessile, una sottile membrana in fibra di cocco o in feltro, in genere utilizzato nei casi di installazioni interne o di piccole dimensioni. In tale supporto non è



b



c

possibile impiantare apparati radicali di piante già mature da oltre 3-5 anni e, inoltre, il sistema richiede un’irrigazione costante a causa della sua incapacità di trattenere l’acqua e fornire un cuscinetto per le radici delle piante.

Infine, vi sono i supporti strutturali: blocchi realizzabili in vari materiali (plastici, metallici o ceramici), di diverse dimensioni e forme e spessori, di lunga durabilità (10-15 anni), di elevata capacità di ritenzione idrica e facilità di manutenzione [118]. Il substrato, oltre il terreno di coltura, contiene dei nutrienti che favoriscono il fabbisogno giornaliero della pianta e un sistema di irrigazione, tuttavia, affinché la co-

a. Dettaglio di parete verde con pianta rampicante e pannelli modulari ancorati al paramento murario.

Fonte: <https://greenscreen.com/product/wall/>

b. Muro vivente realizzato all’interno mediante un supporto plastico con vasi in PVC.

Fonte: <https://www.hausjournal.net/gartenmauer-begruenen>

c. Muro vivente realizzato su un telaio in acciaio presso Elephant and Castle Tube Station a Londra.

Fonte: <https://www.biotope.uk.com/portfolio/elephant-and-castle-tube-station/>

d. Moduli con sistema a traliccio, con staffe distanziatrici regolabili, per l’alloggiamento di piante rampicanti.

Fonte: <https://fatpencilstudio.com/case-studies/greenscreen/>

a. Schema dei flussi di energia tra parete verde e edificio.

Fonte: Campiotti, C. A., et. Al., 2016 [121]

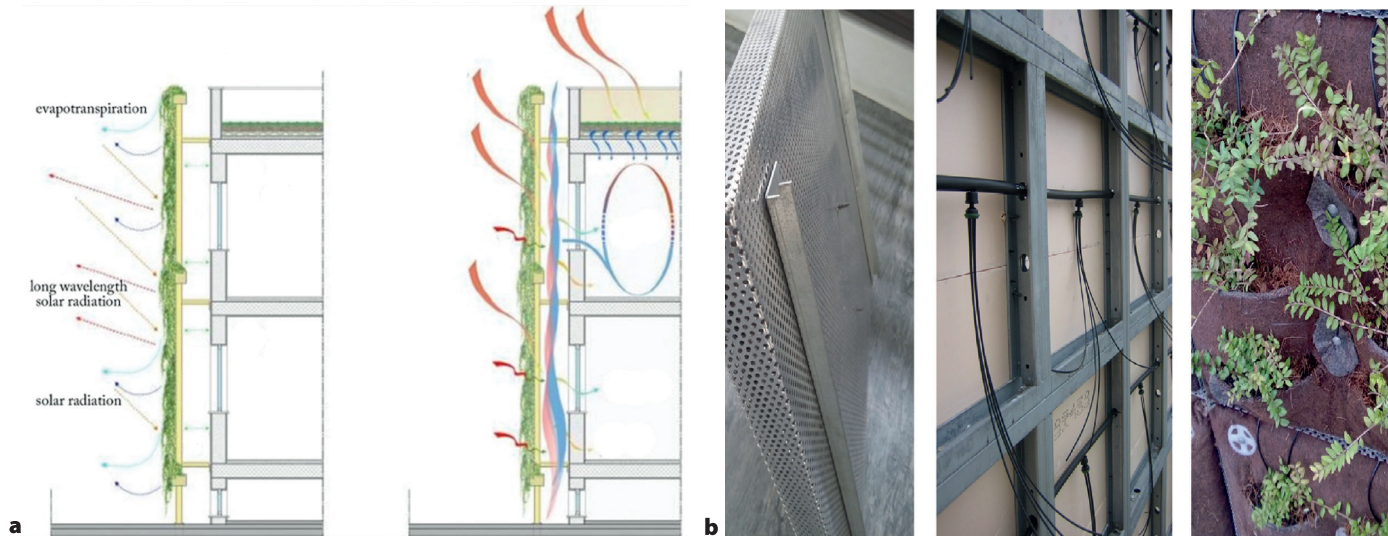
b. Esempio di connessione di parete verde al paramento murario costituita da staffe per l'ancoraggio di una scatola modulare con telaio metallico e sistema di irrigazione integrato.

Fonte: Serra, V., et. al., 2017 [122]

apertura sia costante nell'arco dell'anno la scelta delle piante deve essere accurata in relazione al contesto geografico. La scelta sulla tipologia di vegetazione influisce significativamente sull'evapotraspirazione, sulla fitodepurazione, sull'azione schermante e fonoassorbente e a ciascuna tipologia corrisponde un substrato di coltura adatto. Le installazioni più comuni includono l'implementazione di materiali ad alto albedo che garantiscono il rimbalzo della luce solare riflessa sulla superficie alla radiazione che la colpisce [120], enfatizzando la capacità delle piante di assorbire l'irraggiamento e utilizzarlo nei loro processi biologici naturali.

L'effetto di coibentazione termica delle pareti verdi è correlato alla diversa composizione dei sistemi, tra cui l'eventuale intercapedine

d'aria che può essere chiusa o aperta, a seconda che si debba privilegiare l'effetto isolante o un comportamento assimilabile ad una facciata ventilata. Nel caso di facciata ventilata, l'intercapedine, oltre a favorire la ventilazione e incentivare l'evapotraspirazione dell'apparato fogliare, protegge il costruito esistente da eventuali colonizzazioni biologiche e sollecitazioni meccaniche che le radici potrebbero imprimere sulla facciata deteriorandola fino alla sottrazione materica e/o deformazione parziale della struttura portante. Il moto convettivo indotto dalla parete ventilata è efficace se sono presenti delle aperture alla base e alla sommità della facciata, proteggendo allo stesso tempo l'intercapedine dagli agenti meteorologici.



Bibliografia

1. Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., & Maginnis, S. *Nature-based solutions to address global societal challenges*. IUCN: Gland, Switzerland, 97, **2016**, pp. 2016-2036.
2. Faivre, N., Fritz, M., Freitas, T., De Boissezon, B., & Vandewoestijne, S. *Nature-Based Solutions in the EU: Innovating with nature to address social, economic and environmental challenges*. Environmental research, 159, **2017**, pp 509-518.
3. Frantzeskaki, N., McPhearson, T., Collier, M. J., Kendal, D., Bulkeley, H., Dumitru, A., Pintér, L. *Nature-based solutions for urban climate change adaptation: linking science, policy, and practice communities for evidence-based decision-making*. Bio-Science, 69(6), **2019**, pp. 455-466.
4. Kotsila, P., Anguelovski, I., Baró, F., Langemeyer, J., Sekulova, F., & JT Connolly, J. *Nature-based solutions as discursive tools and contested practices in urban nature's neoliberalisation processes*. *Environment and planning*, Nature and space, 4(2), **2021**, pp. 252-274.
5. Dumitru, A., & Wendling, L., *Evaluating the impact of nature-based solutions: A handbook for practitioners*, **2021**.
6. Harrison, P.A., Dunford, R., Barton, D.N., Kelemen, E., Martín-López, B., Norton, L., Termansen, M., Saaikoski, H., Hendriks, K., Gómez-Baggethun, E., Czúcz, B., García-Llorente, M., Howard, D., Jacobs, S., Karlsen, M., Kopperoinen, L., Madsen, A., Rusch, G., van Eupen, M., Verweij, P., Smith, R., Tuomasjukka, D., and Zulian, G., *Selecting methods for ecosystem service assessment: A decision tree approach*, Ecosystem Services, Vol. 29, **2018**, pp. 481–498.
7. Langemeyer, J., Wedgwood, D., McPhearson, T., Baró, F., Madsen, A.L. and Barton, D.N., *Creating urban green infrastructure where it is needed – A spatial ecosystem service-based decision analysis of green roofs in Barcelona*, Science of The Total Environment, Vol. 707, **2020**, 135487.
8. Tacnet, J.-M., Piton, G., Favier, P., Pengal, P., Curt, C., Yordanova, R., Van Cauwenbergh, N., Giordano, R., *Natural Based Solutions choice and effectiveness assessment: Integrative modelling and decisionaiding framework*, Editions Quae, Versailles, **2021**
9. Bauduceau, N., Berry, P., Cecchi, C., Elmquist, T., Fernandez, M., Hartig, T., Tack, J., *Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities: Final report of the horizon 2020 expert group on Nature-based solutions and re-naturing Cities*, **2015**
10. Baik, J. J., Kwak, K. H., Park, S. B., & Ryu, Y. H., *Effects of building roof greening on air quality in street canyons*. Atmospheric Environment, 61, **2012**, pp. 48-55.
11. Klingberg, J., Broberg, M., Strandberg, B., Thorsson, P., & Pleijel, H., *Influence of urban vegetation on air pollution and noise exposure—a case study in Gothenburg, Sweden*. Science of the Total Environment, 599, **2017**, pp. 1728-1739.
12. Perini, K., Ottelé, M., Giulini, S., Magliocco, A., & Roccotiello, E., *Quantification of*

- fine dust deposition on different plant species in a vertical greening system.* Ecological Engineering, 100, **2017**, pp. 268-276.
13. Lin, M. Y., Hagler, G., Baldauf, R., Isakov, V., Lin, H. Y., & Khlystov, A., *The effects of vegetation barriers on near-road ultrafine particle number and carbon monoxide concentrations.* Science of the Total Environment, 553, **2016** pp. 372-379.
 14. Onishi, A., Cao, X., Ito, T., Shi, F., & Imura, H., *Evaluating the potential for urban heat-island mitigation by greening parking lots.* Urban forestry & Urban greening, 9(4), **2010**, pp. 323-332.
 15. Giordano, R., Montacchini, E., Tedesco, S., Perone, A., *Living wall systems: a technical standard proposal,* in Energy Procedia, 111, **2017**, pp. 298-307.
 16. Olivieri, F., Redondas, D., Olivieri, L., Neila, J., *Experimental characterization and implementation of an integrated autoregressive model to predict the thermal performance of vegetal façades.* Energy and buildings, 72, **2014**, pp. 309-321.
 17. Aakriti S., Takafumi S., *Evaluation of the suppressive effects on solar radiation for a building façade covered with green layers in the Kathmandu valley,* Environmental Challenges, Volume 5, **2021**, 100246, ISSN 2667-0100, <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100246>.
 18. Safikhani, T., Abdullah, A. M., Ossen, D. R., Baharvand, M., *Thermal impacts of vertical greenery systems.* Rigas Tehniskas Universitates Zinatniskie Raksti, 14, **2014**.
 19. Cuce, E., *Thermal regulation impact of green walls: An experimental and numerical investigation.* Applied Energy, 194, **2017**, pp. 247-254.
 20. Romanova, A., Horoshenkov, K. V., Hurrell, A., *An application of a parametric transducer to measure acoustic absorption of a living green wall.* Applied Acoustics, 145, **2019**, pp. 89-97.
 21. Attal, E., Côté, N., Shimizu, T., Dubus, B., *Sound absorption by green walls at normal incidence: physical analysis and optimization.* Acta Acustica united with Acustica, 105(2), **2019**, pp. 301-312.
 22. Baik, J. J., Kwak, K. H., Park, S. B., Ryu, Y. H., *Effects of building roof greening on air quality in street canyons.* Atmospheric Environment, 61, **2012**, pp. 48-55.
 23. Klingberg, J., Broberg, M., Strandberg, B., Thorsson, P., Pleijel, H., *Influence of urban vegetation on air pollution and noise exposure—a case study in Gothenburg, Sweden.* Science of the Total Environment, 599, **2017**, pp. 1728-1739.
 24. Sendra-Arranz, R., Oquendo, V., Olivieri, L., Olivieri, F., Bedoya, C., & Gutiérrez, A., *Monitorization and statistical analysis of south and west green walls in a retrofitted building in Madrid.* Building and Environment, 183, **2020**.
 25. Bianco, L., Serra, V., Larcher, F., Perino, M., *Thermal behaviour assessment of a novel vertical greenery module system: first results of a long-term monitoring campaign in an outdoor test cell,* in Energy Efficiency, 10(3), **2017**, pp. 625-638.
 26. Block, A. H., Livesley, S., & Williams, N.

- S., *Responding to the urban heat island: a review of the potential of green infrastructure*, Victorian Centre for Climate Change Adaptation, **2012**.
27. Pérez, G., Rincón, L., Vila, A., González, J. M., Cabeza, L. F., *Behaviour of green facades in Mediterranean Continental climate*. Energy conversion and management, 52(4), **2011**, pp. 1861-1867.
 28. Safikhani, T., Abdullah, A. M., Ossen, D. R., Baharvand, M., *Thermal impacts of vertical greenery systems*. Rigas Tehniskas Universitates Zinatniskie Raksti, 14, **2014**.
 29. Bass B. *Green roofs and green walls: potential energy savings in the winter. Report on Phase 1*; **2007**.
 30. Dinsdale S, Pearen B, Wilson C. *Feasibility study for green roof application on Queen's University campus*. Queen's Physical Plant Services; **2006**.
 31. Gabriel Pérez, Julià Coma, Ingrid Martorell, Luisa F. Cabeza, *Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 39, **2014**, Pages 139-165, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.055>.
 32. Gabriel Pérez, Lúcia Rincón, Anna Vila, Josep M. González, Luisa F. Cabeza, *Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings*, *Applied Energy*, Volume 88, Issue 12, **2011**, pp. 4854-4859, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.032>.
 33. H.M.P.I.K. Herath, R.U. Halwatura, G.Y. Jayasinghe, *Evaluation of green infrastructure effects on tropical Sri Lankan urban context as an urban heat island adaptation strategy*, *Urban Forestry & Urban Greening*, Volume 29, **2018**, pp. 212-222, ISSN 1618-8667, <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.11.013>.
 34. Perini K., Ottelé M., A.L.A. Fraaij, E.M. Haas, Raiteri, R., *Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope*, *Building and Environment*, Volume 46, Issue 11, **2011**, pp. 2287-2294, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.009>.
 35. Sharp, R., Sable, J., Bertram, F., Mohan, E., Peck, S., *Introduction to Green Walls: technology, benefits & design*, Toronto Green Roofs Heal. Cities, **2008**.
 36. Mazzali, U., Peron, F., Romagnoni, P., Pulselli, R. M., Bastianoni, S., *Experimental investigation on the energy performance of Living Walls in a temperate climate*. *Building and Environment*, 64, **2013**, pp. 57-66.
 37. Kontoleon, K. J., & Eumorfopoulou, E. A., *The effect of the orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone*. *Building and environment*, 45(5), **2010**, pp. 1287-1303.
 38. Kleerekoper, L., Van Esch, M., Salcedo, T. B., *How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect*. *Resources, Conservation and Recycling*, 64, **2012**, pp. 30-38.
 39. Pastore, L., Corrao, R., & Heiselberg, P. K., *The effects of vegetation on indoor thermal comfort: The application of a multi-scale simulation methodology on a residential*

- neighborhood renovation case study*, in Energy and Buildings, 146, **2017**, pp. 1-11
40. Ottelé, M., Perini, K., Fraaij, A. L. A., Haas, E. M., Raiteri, R. *Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems*. Energy and Buildings, 43(12), **2011**, pp. 3419-3429.
 41. Franco, A., Fern andez-Ca ero, R., Pérez-Urrestarazu, L., Valera, D. L. *Wind tunnel analysis of artificial substrates used in active living walls for indoor environment conditioning in Mediterranean buildings*. Building and Environment, 51, **2012**, pp. 370-378.
 42. G.E. McPherson, L.P. Herrington, M. Heisler Gordon *Impacts of vegetation on residential heating and cooling*, Energy Build, 12, **1988**, pp. 41-51.
 43. Sulaiman, M. K. A. M., Jamil, M., Zain, M. F. M., *Solar Radiation Transmission of Green Façade in the Tropics*. Kongres Penyelidikan & Inovasi UKM, **2013**
 44. Herath, H. M. P. I. K., Halwatura, R. U., Jayasinghe, G. Y., *Evaluation of green infrastructure effects on tropical Sri Lankan urban context as an urban heat island adaptation strategy*. Urban Forestry & Urban Greening, 29, **2018**, pp. 212-222.
 45. Pérez, G., Coma, J., Sol, S., Cabeza, L. F., *Green facade for energy savings in buildings: The influence of leaf area index and facade orientation on the shadow effect*. Applied energy, 187, **2017**, pp. 424-437.
 46. Safikhani, T., Abdullah, A. M., Ossen, D. R., Baharvand, M., *Thermal impacts of vertical greenery systems*. Rigas Tehniskas Universit tes Zinatniskie Raksti, 14, **2014**.
 47. Li, H., Zhao, Y., S tztl, B., Kubilay, A., Carmeliet, J., *Impact of green walls on ventilation and heat removal from street canyons: Coupling of thermal and aerodynamic resistance*. Building and Environment, 214, **2022**.
 48. Wong, N. H., Tan, A. Y. K., Chen, Y., Sekar, K., Tan, P. Y., Chan, D., Wong, N. C., *Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls*. Building and environment, 45(3), **2010**, pp. 663-672.
 49. Serra V., Candelari E., Giordano R., *Vertical greening systems and urban heat island related aspects: outcomes of a research project*, in Proceedings of Third International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island, Venezia, **2014**, pp. 1410–1422
 50. Eumorfopoulou, E. A., Kontoleon, K. J., *Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes*. Building and Environment, 44(5), **2009**, pp. 1024-1038.
 51. Pérez, G., Coma, J., Martorell, I., Cabeza, L. F., *Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review. Renewable and sustainable energy reviews*, 39, **2014**, pp. 139-165.
 52. Olivieri, F., Redondas, D., Olivieri, L., Neila, J., *Experimental characterization and implementation of an integrated autoregressive model to predict the thermal performance of vegetal façades*. Energy and buildings, 72, **2014**, pp. 309-321.
 53. Wolverton, B. C., Johnson, A., Bounds, K.,

- Interior landscape plants for indoor air pollution abatement*, No. NASA-TM-101766, **1989**
54. Bandehali, S., Miri, T., Onyeaka, H., Kumar, P., *Current state of indoor air phytoremediation using potted plants and green walls*. *Atmosphere*, 12(4), 473, **2021**
 55. Wood, R. A., Burchett, M. D., Alquezar, R., Orwell, R. L., Tarran, J., Torpy, F., *The potted-plant microcosm substantially reduces indoor air VOC pollution: I. Office field-study*. *Water, Air, and Soil Pollution*, 175(1), **2006**, pp. 163-180.
 56. Pugh, T. A., MacKenzie, A. R., Whyatt, J. D., Hewitt, C. N., *Effectiveness of green infrastructure for improvement of air quality in urban street canyons*. *Environmental science & technology*, 46(14), **2012**, pp. 7692-7699.
 57. Abhijith, K. V., Kumar, P., Gallagher, J., McNabola, A., Baldauf, R., Pilla, F., Pulvirenti, B., *Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments—A review*. *Atmospheric Environment*, 162, **2017**, pp. 71-86.
 58. Kvesitadze, E., Sadunishvili, T., Kvesitadze, G., *Mechanisms of organic contaminants uptake and degradation in plants*. *World Acad Sci Eng Technol*, 55(6), **2009**, pp. 458-468.
 59. Aydogan, A., Montoya, L. D., *Formaldehyde removal by common indoor plant species and various growing media*. *Atmospheric environment*, 45(16), **2011**, pp. 2675-2682.
 60. Xu, Z., Qin, N., Wang, J., Tong, H., *Formaldehyde biofiltration as affected by spider plant*. *Bioresource technology*, 101(18), **2010** pp. 6930-6934.
 61. Liu, Y. J., Mu, Y. J., Zhu, Y. G., Ding, H., Arens, N. C., *Which ornamental plant species effectively remove benzene from indoor air?* *Atmospheric Environment*, 41(3), **2007**, pp. 650-654.
 62. Orwell, R. L., Wood, R. L., Tarran, J., Torpy, F., Burchett, M. D., *Removal of benzene by the indoor plant/substrate microcosm and implications for air quality*. *Water, air, and soil pollution*, 157(1), **2004**, pp. 193-207.
 63. Kazemi, F., Rabbani, M., Jozay, M., *Investigating the plant and air-quality performances of an internal green wall system under hydroponic conditions*. *Journal of Environmental Management*, 275, **2020**.
 64. Irga, P. J., Paull, N. J., Abdo, P., Torpy, F. R., *An assessment of the atmospheric particle removal efficiency of an in-room botanical biofilter system*. *Building and Environment*, 115, **2017**, pp. 281-290.
 65. Kumar, P., Druckman, A., Gallagher, J., Gatersleben, B., Allison, S., Eisenman, T. S., ... & Morawska, L., *The nexus between air pollution, green infrastructure and human health*. *Environment international*, 133, **2019**.
 66. Torpy, F. R., Zavattaro, M., Irga, P. J., *Green wall technology for the phytoremediation of indoor air: a system for the reduction of high CO2 concentrations*. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 10(5), **2017**, pp. 575-585.
 67. Darlington, A. B., Dat, J. F., Dixon, M. A., *The biofiltration of indoor air: air flux and*

- temperature influences the removal of toluene, ethylbenzene, and xylene.* Environmental science & technology, 35(1), **2001**, pp. 240-246.
68. Tomašević, M., & Aničić, M., *Trace element content in urban tree leaves and SEM-EDAX characterization of deposited particles.* Facta Universitatis-Series: Physics, Chemistry and Technology, 8(1), **2010**, pp. 1-13.
 69. Nowak, D. J., Crane, D. E., Stevens, J. C., *Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States.* Urban forestry & urban greening, 4(3-4), **2006**, pp. 115-123.
 70. Smith, K. R., *Biofuels, air pollution, and health: a global review.* Plenum Press New York and London, **2013**
 71. Lee, J. H., *An overview of phytoremediation as a potentially promising technology for environmental pollution control.* Biotechnology and Bioprocess Engineering, 18(3), **2013**, pp. 431-439.
 72. Kalansuriya, C.M., Pannila, A.S., Sonnadara, D.U.J., *Effect of roadside vegetation on the reduction of traffic noise levels.* In: Proceedings of the Technical Sessions of the Institute of Physics, Sri Lanka, **2009**, pp. 1-6.
 73. Lacasta, A. M., Penaranda, A., Cantalapie-dra, I. R., Auguet, C., Bures, S., Urrestarazu, M., *Acoustic evaluation of modular greenery noise barriers,* in Urban Forestry & Urban Greening, 20, **2016**, pp. 172-179
 74. Kotzen, B., English, C., *Environmental noise barriers: a guide to their acoustic and visual design.* CRC Press, **2014**
 75. Cook, D. I., Van Haverbeke, D. F., *with Plant Materials and Solid Barriers.* In The Conference on Metropolitan Physical Environment: Held at Syracuse, New York, **1975**, pp.25-29.
 76. Martens, M. J., Michelsen, A., *Absorption of acoustic energy by plant leaves.* The Journal of the Acoustical Society of America, 69(1), **1981**, pp. 303-306.
 77. Horoshenkov, K. V., Khan, A., Benkreira, H., *Acoustic properties of low growing plants.* The Journal of the Acoustical Society of America, 133(5), **2013**, pp. 2554-2565.
 78. Yang, H. S., Kang, J., Cheal, C., *Random-incidence absorption and scattering coefficients of vegetation.* Acta Acustica united with Acustica, 99(3), **2013**, pp. 379-388.
 79. Wong, N. H., Tan, A. Y. K., Tan, P. Y., Chiang, K., Wong, N. C., *Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls.* Building and environment, 45(2), **2010**, pp. 411-420.
 80. D'Alessandro, F., Asdrubali, F., Mencarelli, N., *Experimental evaluation and modeling of the sound absorption properties of plants for indoor acoustic applications.* Building and Environment, 94, **2015**, pp. 913-923.
 81. Bregón, N. F., Urrestarazu, M., Valera, D. L., *Algunos usos de la visión artificial y su aplicación en la horticultura protegida.* Vida rural, (343), **2012**, pp. 46-48.
 82. Scamoni, F., Scrosati, C., Depalma, M., & Barozzi, B., *Experimental evaluations of acoustic properties and long-term analysis of a novel indoor living wall.* Journal of Building Engineering, 47, **2022**

83. Candelari, E., Tarizzo, P., Serra, V., Schiavi, A., Russo, F., *Acoustic performance of a green modular system*. Atti del Convegno AIA-DAGA, **2013**, pp. 746-749.
84. Serra, V., Bianco, L., Candelari, E., Giordano, R., Montacchini, E., Tedesco, S., Schiavi, A., *A novel vertical greenery module system for building envelopes: The results and outcomes of a multidisciplinary research project*. Energy and Buildings, **146**, **2017**, pp. 333-352.
85. Azkorra, Z., Pérez, G., Coma, J., Cabeza, L. F., Burés, S., Álvaro, J. E., Urrestarazu, M., *Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system for buildings*. Applied acoustics, **89**, **2015**, pp. 46-56.
86. Ebrahimpour, A., Maerefat, M., *Application of advanced glazing and overhangs in residential buildings*. Energy Conversion and Management, **52**(1), **2011**, pp. 212-219.
87. Kirimtat, A., Koyunbaba, B. K., Chatzikonstantinou, I., & Sariyildiz, S., *Review of simulation modeling for shading devices in buildings*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, **53**, **2016**, 23-49.
88. Ip, K., Marta, L., Miller, A., *Bioshaders for sustainable buildings*. In CIB World Building Congress, **2004**.
89. Sunakorn, P., Yimprayoon, C., *Thermal performance of biofacade with natural ventilation in the tropical climate*. Procedia Engineering, **21**, **2011**, pp. 34-41.
90. Ip, K., Lam, M., Miller, A., *Shading performance of a vertical deciduous climbing plant canopy*. Building and Environment, **45**(1), **2010**, pp. 81-88.
91. Perez, G., Rincon, L., Vila, A., Gonzalez, J. M., & Cabeza, L. F., *Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings*. Applied energy, **88**(12), **2011**, pp. 4854-4859.
92. Li, D. H., Wong, S. L., *Daylighting and energy implications due to shading effects from nearby buildings*. Applied Energy, **84**(12), **2007**, pp. 1199-1209.
93. Zheng, X., Dai, T., Tang, M., *An experimental study of vertical greenery systems for window shading for energy saving in summer*. Journal of Cleaner Production, **259**, **2020**
94. Elsadek, M., Liu, B., Lian, Z., *Green façades: Their contribution to stress recovery and well-being in high-density cities*. Urban Forestry & Urban Greening, **46**, **2019**.
95. Connell, B. R., Wolf, S. L., Atlanta FICSIT Group., *Environmental and behavioral circumstances associated with falls at home among healthy elderly individuals*. Archives of physical medicine and rehabilitation, **78**(2), **1997**, pp. 179-186.
96. Wolf, K. L., *Public response to the urban forest in inner-city business districts*. Journal of Arboriculture. **29** (3): 117-126., **29**(3), **2003**, pp. 117-126.
97. Joye, Y., Willems, K., Brengman, M., Wolf, K., *The effects of urban retail greenery on consumer experience: Reviewing the evidence from a restorative perspective*. Urban Forestry & Urban Greening, **9**(1), **2010**, pp. 57-64.
98. Kuo, F. E., Sullivan, W. C., *Environment and crime in the inner city: Does vegetation*

- reduce crime?* Environment and behavior, 33(3), **2001**, pp. 343-367.
99. Bartesaghi Koc, C., Osmond, P., Peters, A., *Towards a comprehensive green infrastructure typology: a systematic review of approaches, methods and typologies*. Urban ecosystems, 20(1), **2017**, pp. 15-35.
 100. Rosato, P., Berto, R., Stival, C. A., Cechet, G., Valcovich, E., *Le coperture verdi: Implicazioni tecnologiche, strutturali, energetiche ed economico-sociali*. EUT, **2015**
 101. Rakhshandehroo, M., Mohd Yusof, M. J., Arabi, R., *Living wall (vertical greening): Benefits and Threats*. In Applied Mechanics and Materials Vol. 747, **2015**, pp. 16-19.
 102. Ente Italiano di Normazione, *UNI 11235:2015 Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde*, **2015**
 103. Zhang, G., He, B. J., Zhu, Z., Dewancker, B. J., *Impact of morphological characteristics of green roofs on pedestrian cooling in subtropical climates*. International journal of environmental research and public health, 16(2), 179, **2019**
 104. Kosareo, L., Ries, R., *Comparative environmental life cycle assessment of green roofs*. Building and environment, 42(7), **2007**, pp. 2606-2613.
 105. Cascone, S., *Green roof design: State of the art on technology and materials*. Sustainability, 11(11), **2019**
 106. Vijayaraghavan, K., *Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends*. Renewable and sustainable energy reviews, 57, **2016**, pp. 740-752.
 107. Peng, L. L., Jim, C. Y., *Green-roof effects on neighborhood microclimate and human thermal sensation*. Energies, 6(2), **2013**, pp. 598-618.
 108. Morakinyo, T. E., Dahanayake, K. K. C., Ng, E., Chow, C. L., *Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities: A co-simulation parametric study*. Energy and Buildings, 145, **2017**, pp. 226-237.
 109. Ng, E., Chen, L., Wang, Y., Yuan, C., *A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong*. Building and environment, 47, **2012**, pp. 256-271.
 110. Catalano, C., Brenneisen, S., Baumann, N., Guarino, R., *I tetti verdi di tipo estensivo: biodiversità ad alta quota*. Reticula, 2016(12), **2016**, pp. 1-10.
 111. Cascone, S., Coma, J., Gagliano, A., Perez, G., *The evapotranspiration process in green roofs: A review*. Building and environment, 147, **2019**, pp. 337-355.
 112. Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M., *Green roof benefits, opportunities and challenges—A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 90, **2018**, pp. 757-773
 113. Rapisarda, R., Nocera, F., Costanzo, V., Sciuto, G., Caponetto, R., *Hydroponic Green Roof Systems as an Alternative to Traditional Pond and Green Roofs: A Literature Review*. Energies, 15(6), **2022**
 114. Feng, H., Hewage, K., *Lifecycle assessment of living walls: air purification and energy*

- performance*. Journal of Cleaner Production, 69, **2014**, pp. 91-99.
115. Gunawardena, K., Steemers, K., *Living walls in indoor environments*. Building and Environment, 148, **2019**, pp. 478-487.
116. Manso, M., Castro-Gomes, J., *Green wall systems: A review of their characteristics*. Renewable and sustainable energy reviews, 41, **2015**, pp. 863-871.
117. Lin, H., Xiao, Y., Musso, F., Lu, Y., *Green façade effects on thermal environment in transitional space: Field measurement studies and computational fluid dynamics simulations*. Sustainability, 11(20), **2019**.
118. El Menshawy, A. S., Mohamed, A. F., Fathy, N. M., *A comparative study on green wall construction systems, case study: South valley campus of AASTMT*. Case Studies in Construction Materials, 16, **2022**
119. Bit, E. *Il Nuovo Verde Verticale: Tecnologie, Progetti, Linee Guida*, Wolters Kluwer Italia S.r.l., **2012**
120. Campiotti, C. A., Giagnacovo, G., Latini, A., Margiotta, F., Nencini, L., Pazzola, L., & Puglisi, G., *Le coperture vegetali per la sostenibilità energetica ed ambientale degli edifici*. ENEA, Report Ricerca di Sistema Elettrico, RdS/PAR2016/075, **2016**
121. Oncel, S. S., Şenyay Öncel, D., *Bioactive façade system symbiosis as a key for eco-beneficial building element*. In Environmentally-Benign Energy Solutions, Springer, **2020**, pp. 97-122
122. Serra, V., Bianco, L., Candelari, E., Giordano, R., Montacchini, E., Tedesco, S., Schiavi, A., *A novel vertical greenery module system for building envelopes: The results and outcomes of a multidisciplinary research project*, in Energy and Buildings 146, **2017**, pp. 333-352

Capitolo 3

Elementi e materiali bio-based per il comfort indoor degli edifici esistenti

Chapter 3. Bio-based components and materials for indoor comfort of existing buildings

The need for a parsimonious use of resources, the individuation of new objectives of environmental compatibility, and the reuse of existing resources are the necessary condition to guarantee a sustainable environment for future generations. These needs have brought out a new interest in more sustainable technologies and architecture, which lead to prefer the employment of low-harm materials for users' health and to save the existing resources.

The analysis of the life cycle of construction materials reveals that any material used in a building goes through realization, some treatment, and, at the end of its employment, landfilling. These actions always entail the release of polluting substances into the atmosphere and the consumption of resources. Hence, it is impossible to have 100% non-polluting bio-based components or materials; however, it is possible to

orient toward less invasive solutions for the environment and human health.

Bio-based materials are generated from natural waste; for sure, compared to several standard construction products, they are not harmful to humans and the environment, and, in a deeper perspective, their use considerably supports the achievement of the Sustainable Development Goals [1]. Some of these eco-compatible materials include insulating materials in wood fiber, hemp, or sheep wool, clay or lime plasters, and structural materials such as wood or rammed earth. Recent research activities are oriented toward the experimentation of the performances of bio-composite materials with waste from the agricultural sector [2]. The construction field consumes a high quantity of raw materials, and 50% of them are unrenewable natural resources. In Europe, it is estimated that over 40% of total energy production is consumed by the construction sector [3]. However, construction activities are inevitable, and they are estimated to grow

on a global scale, especially in developing countries, due to the absolute necessity of new structures and infrastructures. One of the immediate consequences of this exploitation is a consistent deprivation of environmental resources, together with considerable waste production.

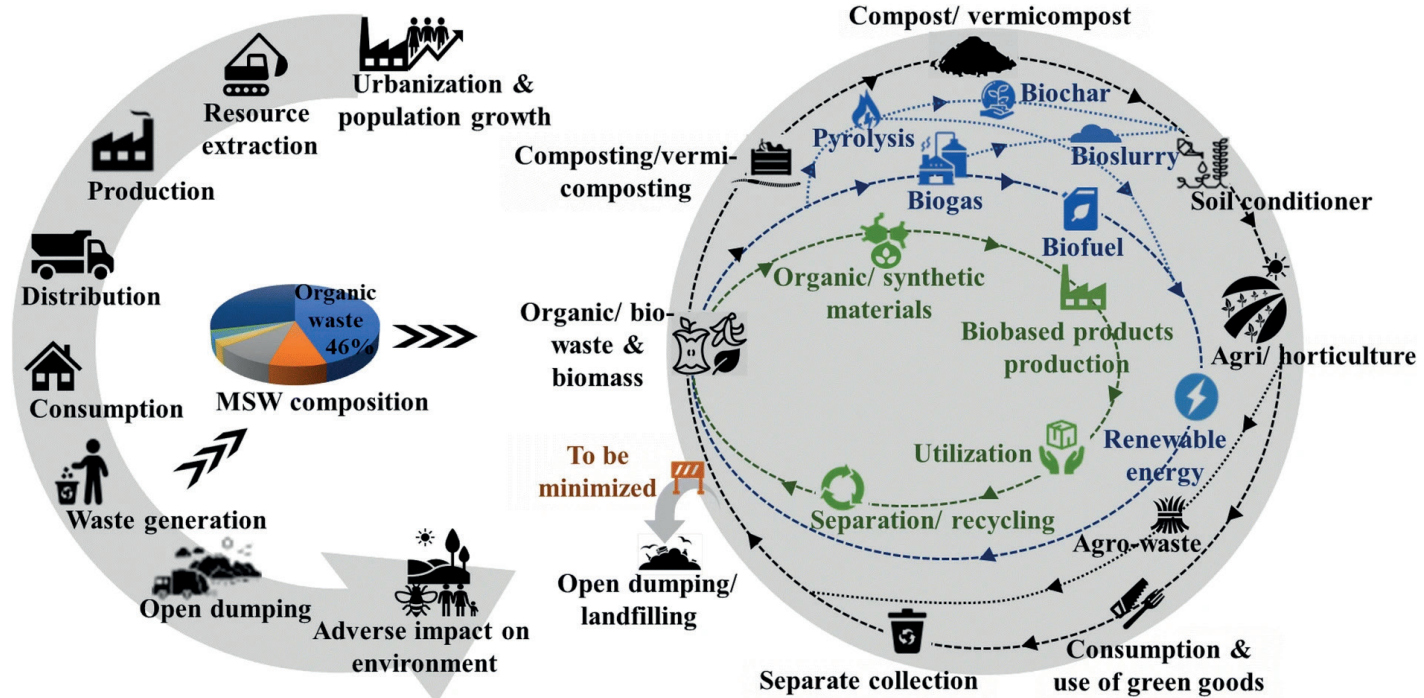
The continuous risk of over-pollution, depletion of natural resources, alteration of natural environments, global warming, etc., is well-known in the whole world. This is mainly caused by unsustainable mass industry, especially in the construction field, where activities are massive and highly polluting. Moreover, it is renowned that the current industrial system, based on treatment and disposal, often faces several difficulties and leads to a large loss of economic resources, in addition to the quantity of greenhouse gas emissions [4].

Environmental sustainability within the concept of sustainable development is the base of the current economic model, that is circular economy, which has radically substituted the obsolete linear model. Among the principle: extend the life cycle of products, reduce the use of raw materials and waste production, and give a new life to waste by inserting it again into the production cycle [5].

Hence, it is now urgent and inevitable to achieve smarter waste management: the use of natural products from recycling waste can be an efficient way to obtain new

salubrious products for people and the environment. As a support, the new communitarian directions for Green Public Procurement (GPP, green purchases for the Public Administration) have oriented the markets toward products with rigorous criteria of environmental certification. This triggers in building component manufacturers the need and the will to use new materials from renewable sources, recycled or recovered from other sectors. Bio-based or green architecture is a new way to design and build in accordance with GPP and the principles of Circular Economy.

The scientific literature shows a huge interest in this subject, as it has introduced several solutions for architecture and civil engineering, which include the reuse of organic waste to improve building sustainability. At the same, this gives a new life to waste material and provides the manufacturing industry with a financial surplus. In the last years, the great potential in the use of these materials has emerged in the building sector, after performing the required transformations for their reintroduction in the processes and the realization of innovative products. The history of architecture and construction displays a huge range of cases in which poor vegetal matter or waste have been reused with notable performance; even more, in contemporary research, these have a large room for application with renewed performance.



3.1 Contributo dei prodotti da costruzione sulla qualità dell'aria

Gli aspetti ambientali che i materiali bio-based determinano collimano con i benefici per l'uomo e la qualità dell'aria è il principale. La qualità dell'aria è uno degli aspetti principali per il comfort indoor se si pensa che l'uomo trascorre mediamente il 90% del tempo quotidiano all'interno di edifici [7]. Le ripercussioni in termini di salute e benessere che l'uomo ha respirando un'aria non pulita sono riconosciute

dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), che ne indica l'inquinamento atmosferico quale principale fattore di rischio ambientale per la salute della popolazione mondiale, con conseguenze degeneranti a serie malattie e disturbi di vario genere. Nella concentrazione di particolato, ozono, biossido di azoto e biossido di zolfo l'OMS indica un rischio per la salute dell'uomo già in pubblicazioni degli anni Cinquanta del Novecento [8].

Le principali fonti interne di inquinamento sono rappresentate da: occupanti (uomo, ani-

Passaggio dall'economia lineare a quella circolare. Economia lineare: sfruttamento, produzione, consumo e generazione di rifiuti delle risorse che portano al deterioramento ambientale. Economia circolare, esempio basato sui flussi di risorsa organici: un sistema a circuito chiuso per mantenere le risorse nella loro massima utilità ai fini della sostenibilità socio-economica e ambientale. Fonte: Srivastava, V., et al., 2020) [6]

mali), polvere (ricettacolo per i microrganismi), strutture, materiali edili, arredi, impianti (condizionatori, umidificatori, impianti idraulici) e aria esterna [9].

I materiali da costruzione, in particolare, possono rappresentare una importante fonte di inquinamento indoor durante tutto il loro ciclo di vita utile, in misura maggiore subito dopo il completamento dell'edificio. Le emissioni di composti organici volatili (COV) dai materiali sintetici nuovi diminuiscono con il passare dei mesi, ma contemporaneamente inizia il degrado fisiologico dell'edificio e quindi il rilascio di ulteriori sostanze inquinanti. L'invecchiamento dei materiali da costruzione genera il dissiparsi nell'aria di agenti chimici (ozono, umidità) e fisici (calore e radiazioni UV) che possono causare emissioni secondarie differite nel tempo e che contribuiscono all'inquinamento indoor [10]. Gli agenti fisici che incidono sulla qualità dell'aria sono il radon, i campi elettromagnetici (CEM) ed il rumore. Il radon è un elemento radioattivo che si disperde rapidamente e non raggiunge quasi mai elevate concentrazioni, ma negli ambienti confinati può raggiungere livelli di concentrazioni tali da rappresentare un rischio per la salute degli occupanti.

Le sostanze inquinanti si concentrano ancor più in assenza di ventilazione, poiché si attaccano al pulviscolo e possono essere inalate. Tra quelle più usuali che si riscontrano in un ambiente interno e che sono associabili ai materiali da costruzione vi sono funghi e muffe causati dall'umidità che si depositano sul materiale e lentamente rilasciano nell'aria agenti biologi-

ci. Altri noti sono polveri e particolati, COV, allergeni, formaldeide, piombo, amianto, monossido di carbonio, anidride carbonica e ozono [11].

Tra le sostanze inquinanti quelle più diffuse all'interno di ambienti abitativi sono la formaldeide e i COV, queste sono presenti nella composizione di diversi prodotti industriali sia da costruzione che per finitura, dai quali vengono rilasciati per lenta emissione sostanze utilizzate come solventi in fase produttiva. Le normative europee, infatti, si concentrano sui metodi di prova e sui limiti di tali due sostanze, anche se di fatti, pur essendo le principali, non sono le uniche.

I prodotti a base biologica possono contribuire positivamente al miglioramento della qualità dell'aria interna per vari aspetti. In primo luogo, la natura igroscopica dei prodotti bio-based consente l'adsorbimento del vapore acqueo nella loro struttura porosa, in equilibrio con l'ambiente circostante [12]. Ciò consente di ridurre al minimo le fluttuazioni dell'ambiente termoigrometrico, contribuendo così al miglioramento della qualità ambientale interna e riducendo le malattie respiratorie legate all'umidità e anche il fabbisogno energetico per la climatizzazione. La capacità igroscopica e allo stesso tempo traspirante è, peraltro, piuttosto adatta per elementi a contatto diretto con altre superfici, in particolar modo negli involucri edilizi privi di ventilazione dove è facile che possa generarsi la condensazione del vapore acqueo con il conseguente proliferare di muffe; queste ultime associate ad asma e reazioni allergiche.

In secondo luogo, le emissioni inquinanti di questi materiali ecocompatibili sono risultate in diverse sperimentazioni inferiori rispetto ai materiali da costruzione convenzionali, anzi, alcuni materiali bio-based, come la lana, sono in grado di purificare l'aria interna grazie alla reattività con le concentrazioni di ozono o per mezzo della presenza di gruppi amminici altamente reattivi con sostanze organiche volatili, formaldeide e dodecano [13]. Infine, la natura porosa, la capacità filtrante e le elevate proprietà di adsorbimento contribuiscono a limitare l'ingresso di inquinanti esterni. La tabella che segue è una sintesi delle principali sostanze inquinanti emesse nell'aria da prodotti di costruzione. La tabella espone, inoltre, gli effetti di salute che

le sostanze provocano all'uomo se inalate e, inoltre, la tecnica di valutazione dell'emissività di queste, esposta in dettaglio nel paragrafo successivo.

3.2 Valutazione emissività e limiti di emissione dei prodotti da costruzione

Un edificio può essere considerato a basso inquinamento, se la maggior parte dei materiali ed elementi di cui si compone hanno una contenuta emissività di sostanze volatili. I materiali che, pur non essendo bio-based, in genere hanno un impatto basso sulla qualità dell'aria sono quelli di origine naturale che non subisco-

Tabella 1 Inquinanti principali ed effetto sulla salute dell'uomo emessi da materiali di costruzione

Composto	Fonte di emissione	Effetto sulla salute	Tecnica analitica
Formaldeide	Pannelli in legno, adesivi, resine, pannelli di fibra, pannelli di trucioli, compensato	Irritazione, cancro, asma	Radiello impregnato con DNPH, analisi HPLC o GC-MS
BTEX (benzene, toluene, etilbenzene e xilene)	Materiali in legno, pannelli di trucioli, vernici, laminati, mobili	Anemia, cancro, effetti immunologici, irritazione, effetti sul sistema nervoso e sul sistema respiratorio, danni al fegato e ai reni	provetta, analisi GC-FID
Ftalati	Vernici, plastiche, pavimenti vinilici, rivestimenti murali	Problemi di fertilità maschile, problemi ormonali maschili, problemi nello sviluppo neurologico	provetta, analisi GC-MS
Terpeni	Materiali a base di legno	Irritazione	provetta, analisi GC-MS
Composti clorurati	Polimeri di PVC	Irritazione, tossicità, possibilmente cancerogeno	campionamento fibra SPME, analisi GC-MS

* DNPH: composto derivato dell'idrazina; SPME: Microestrazione in fase solida; FID: Rivelatore a ionizzazione di fiamma
Fonte: Ruiz-Jimenez, J., et. Al., 2022 [13]

no processi derivanti da sintesi chimica, tra i quali: i materiali lapidei, vitrei e ceramici. Le emissioni nocive dovute ai materiali da costruzione, si possono scindere in primarie e secondarie: le prime sono dovute al rilascio di composti volatili presenti nel materiale, la cui velocità di emissione dipende dalla diffusione di essi all'interno del prodotto; le seconde sono caratterizzate da composti prodotti a seguito di reazioni chimiche che hanno luogo nell'ambito del processo di produzione e per esse si verifica una velocità di emissione sensibilmente più bassa rispetto alle emissioni primarie [14].

Il problema delle emissioni perdura durante tutto il ciclo di vita utile dell'edificio e, dunque, per assicurare una giusta salubrità per l'uomo è necessario conoscere questo aspetto per i prodotti che costituiscono l'edificio, con particolare attenzione a quelli direttamente esposti all'ambiente interno.

Questo tipo di informazione è raccolta nella dichiarazione di prestazione, facente parte della documentazione utile all'ottenimento della marcatura CE.

La marcatura CE dei materiali o elementi edili utilizzati nell'ambiente interno degli edifici richiede, infatti, una certificazione delle loro emissioni di Composti Organici Volatili nell'aria. Ciò necessita l'esecuzione di prove e processi per la valutazione del prodotto da costruzione che siano stabiliti da una norma armonizzata da parte del Comitato Europeo di Normazione (CEN) nel caso degli Stati membri europei. Tale procedura è obbligatoria per la commercializzazione dei prodotti da costruzione; il marchio CE è, infatti, richiesto come pre-

requisito affinché essi siano venduti in qualsiasi Stato membro dell'Unione Europea (UE).

L'Unione Europea ha pubblicato il regolamento UE n. 305/2011, in vigore dal 2013, secondo il quale le opere di costruzione devono essere concepite e realizzate in modo da non rappresentare, durante il loro intero ciclo di vita, una minaccia per l'igiene o la salute e la sicurezza degli occupanti e da non esercitare un impatto eccessivo, per tutto il loro ciclo di vita, sulla qualità dell'ambiente o sul clima, durante la loro costruzione, uso e demolizione, in particolare a causa di uno dei seguenti eventi: sviluppo di gas tossici; emissione di sostanze pericolose, composti organici volatili, gas a effetto serra o particolato pericoloso nell'aria interna o esterna; umidità in alcune parti delle opere edili o sulle superfici al loro interno [15]. Quindi, nessuna particella o gas pericolosi devono essere rilasciati nell'aria. Per rispondere a questo obiettivo la Commissione Europea ha incaricato il CEN di sviluppare un metodo di prova armonizzato per misurare le emissioni di COV e SCOV (Composti Organici Semi Volatili) che ha dato vita al comitato CEN/TC 351.

La norma tecnica armonizzata, sviluppata dal CEN/TC 351 è la UNI EN 16516:2020 e specifica un metodo di riferimento per la determinazione delle emissioni, in ambiente interno, di sostanze pericolose da prodotti da costruzione [16]. Il riferimento internazionale della UNI EN 16516:2020 è la norma EN ISO 16000-9:2006 "Determinazione delle emissioni di composti organici volatili da prodotti da costruzione e arredo - Metodo della camera di emissione" [17]. Il metodo si basa su un'analisi qualitativa

e quantitativa eseguita mediante un gascromatografo accoppiato ad un rivelatore a spettrometria di massa che ricrea le condizioni di vita normalmente presenti in ambienti di vita indoor e ne calcola i valori. L'aria all'interno della camera di prova ventilata è continuamente miscelata e campionata a intervalli regolari (in genere dopo 3 giorni e dopo 28 giorni).

Il metodo è applicabile ai composti organici volatili, semivolatili e aldeidi volatili ed è basato sull'utilizzo di una camera di prova e della conseguente analisi dei composti organici tramite GC-MS o HPLC [18]. Uno strumento (HPLC/GC) separa i componenti e un secondo strumento (MS) fornisce una determinazione della massa per ciascuno dei componenti e quindi ulteriori informazioni per l'identificazione delle singole sostanze. GC è una gascromatografia, tecnica cromatografica su colonna, utile per separare componenti in miscele che si vaporizzano facilmente senza decomposizione. I due principali usi di queste tecniche sono: determinare la purezza di un campione e separare i componenti in una miscela. Nella tecnica GC le eventuali sostanze inquinanti emesse dal campione analizzato interagiscono con un gas o un materiale polimerico su un supporto solido inerte, con diverse percentuali di eluizione per le componenti diverse poiché le interazioni tra componenti nel campione e il gas sono diverse l'una dall'altra. L'utilità analitica della tecnica GC consta anche nella possibilità di confrontare i tempi di ritenzione per ciascun componente. HPLC è la cromatografia liquida ad alte prestazioni e differisce dalla tecnica GC per utilizzare come reagente una sostanza soli-

da (solitamente una fibra) con la quale interagiscono le sostanze inquinanti [19].

La conformità ai valori limite di riferimento può essere dimostrata mediante la presentazione di un rapporto di prova, rilasciato da un laboratorio di prova con un accreditamento EN ISO/IEC 17025. Il rapporto di prova deve includere le norme di prova pertinenti o mostrare una valida attestazione di conformità a qualsiasi regolamento o un'etichetta volontaria. I valori di riferimento accettabili sono stati codificati solo in parte a livello europeo poiché la casistica è troppo varia: sono varie le tipologie di sostanze inquinanti e sono in progressivo divenire i nuovi materiali da costruzione compositi; la Commissione Europea è a tutt'oggi a lavoro per armonizzare le dichiarazioni sulle emissioni dai prodotti da costruzione.

In Italia, il Decreto 11 ottobre 2017 "Criteri ambientali minimi (CAM) per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici" impone l'utilizzo del 15% di materiali di materia prima seconda e stabilisce che il progettista deve specificare le informazioni sull'emissività dei prodotti scelti per rispondere ai criteri minimi [20]. Il progettista deve, altresì, assicurarsi che in fase di approvvigionamento l'appaltatore fornisca la documentazione tecnica che ne dimostri il rispetto dei suddetti criteri. La determinazione delle emissioni deve avvenire in conformità alla norma tecnica CEN/TS 16516 o UNI EN ISO 16000-9.

Il Decreto individua alcune categorie di materiali per le quali sono indicate le prescrizioni

Tabella 2 Limite di emissione (mg/m³) a 28 giorni

Benzene Tricloroetilene (trielina) di-2-etilesilftalato (DEHP) Dibutilftalato (DBP)	1 (per ogni sostanza)
COV totali	1500
Formaldeide	< 60
Acetaldeide	< 300
Toluene	< 450
Tetracloroetilene	< 350
Xilene	< 300
1,2,4-Trimetilbenzene	< 1500
1,4-diclorobenzene	< 90
Etilbenzene	< 1000
Butossietanolo	< 1500
2- Stirene	< 350

Fonte: Repubblica Italiana, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, DM 11 ottobre 2017 (CAM)

sui limiti di emissione e sono le seguenti: pitture e vernici per interni; pavimentazioni (sono escluse le piastrelle di ceramica e i laterizi, qualora non abbiano subito una lavorazione post cottura con applicazioni di vernici, resine o altre sostanze di natura organica), incluso le resine liquide; adesivi e sigillanti; rivestimenti interni (escluse le piastrelle di ceramica e i laterizi); pannelli di finitura interni (comprensivi di eventuali isolanti a vista); controsoffitti; schermi al vapore sintetici per la protezione interna del pacchetto di isolamento. Tali materiali e componenti devono rispettare il limite di emissione per specifica sostanza inquinante (riportato nella Tabella n.2).

Come si può notare il Decreto elenca solo alcuni dei possibili prodotti da costruzione con il quale l'utente può venire a contatto nell'ambiente interno; nulla è specificato per intonaci, infissi, partizioni o altri elementi costruttivi che non abbiano una particolare finitura, lasciati a vista.

Per i pannelli a base di legno, esiste una specifica normativa. Essi vengono classificati in base alle loro emissioni di formaldeide, seguendo i criteri riassunti nell'appendice B della UNI EN 13986:2015 (e nelle altre varie norme EN di prodotto, quali, ad esempio, la EN 312 per il truciolare, la EN 622 per i pannelli di fibra e la UNI

EN 636:2015 per il compensato) [21]. La norma definisce i pannelli a base di legno per l'utilizzo nelle costruzioni e specifica le relative caratteristiche pertinenti e i metodi di prova appropriati per determinare queste caratteristiche.

I pannelli sono classificati in due classi di emissione: E1 e E2. La classe di emissione viene assegnata al prodotto sulla base di prove iniziali e periodiche di controllo durante la fase produttiva. I pannelli di classe E1 (a basse emissioni) causano una concentrazione di equilibrio nell'aria della camera di prova minore o uguale a 0,1 ppm (0,124 mg/m³), limite raccomandato dall'Organizzazione Mondiale della Sanità per gli ambienti di vita e soggiorno.

Tutti i tipi di pannelli devono presentare un rapporto di prova secondo il metodo previsto dalla norma UNI EN 717-1:2004 [22]. Il test consiste nel posizionamento di un campione in una camera di prova per emissioni COV che simula un ambiente interno reale; si controlla nel tempo il tasso e la proprietà di rilascio dei contaminanti. Esistono dei pannelli con truciolari di legno incollati con assenza di formaldeide, prodotti con collanti a base di poliuretano (PMDI). Questi presentano quindi la dicitura F0 o NAF (No-added Formaldehyde), e per essi si esegue il test previsto dalla norma CEN/TS 16516.

3.3 Processi ed etichette per la certificazione e la commercializzazione dei prodotti bio-based

Problematica, rispetto ad una logica di commercializzazione, è la mancanza di normativa di riferimento e, quindi, di indicazioni di pro-

cesso e test di prodotto, rendendo più complesso il processo di certificazione. Nell'ambito normativo, infatti, ci sono parecchie lacune relativamente a processi, prodotti e commercializzazione. Né risulta possibile l'analogia con normative relative a prodotti convenzionali perché questi ultimi sono considerati se di origine minerale o sintetica.

Anche se mediante una procedura complessa, nei processi per la certificazione e la commercializzazione dei prodotti, esposti di seguito, è prevista la possibilità di immettere nel mercato un prodotto innovativo, composto in parte da materia prima seconda, contemplando procedure per l'attestazione della qualità di materiali e prodotti per i quali non sia disponibile una norma armonizzata.

Nonostante il gap tra la sperimentazione di nuovi materiali bio-based e la normativa che ne regola le prestazioni, l'introduzione nel mercato di tali prodotti dovrebbe essere consuetudine se si pensa alle politiche, ormai ampiamente attuate, indirizzate agli Acquisti Verdi della Pubblica Amministrazione, c.d. Green Public Procurement (GPP). In riferimento al GPP, condiviso in ambito internazionale da più istituzioni tra cui l'Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), la PA stabilisce i criteri per gli acquisti al fine di diminuire gli impatti ambientali, tenendo conto del ciclo di vita dei prodotti.

In Italia, nell'ambito del Piano d'azione nazionale sul GPP (PANGPP), sono fissati i Criteri Ambientali Minimi (CAM) per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione

di edifici pubblici. Il progettista deve fornire l'elenco dei materiali costituiti, anche parzialmente, da materie recuperate o riciclate ed il loro peso rispetto al peso totale dei materiali utilizzati. La percentuale di materia riciclata deve essere dimostrata tramite una delle seguenti opzioni: una dichiarazione ambientale di Prodotto di Tipo III (EPD); una certificazione di prodotto rilasciata da un organismo di valutazione della conformità (ReMade in Italy®, Plastica Seconda Vita o equivalenti) che attesti il contenuto riciclato attraverso l'esplicitazione del bilancio di massa [23].

La EPD, non obbligatoria per la commercializzazione, ma utile al produttore per distinguere il proprio prodotto da quello di aziende competitor, è una tra le certificazioni ambientali di prodotto o eco-etichette. La certificazione di prodotto, tra le più comuni, etichette ecologiche, è l'attestazione che un prodotto, prima di essere immesso sul mercato, è stato sottoposto da un organismo accreditato di terza parte, alle verifiche necessarie per accertare la conformità ai requisiti previsti dalle direttive europee e/o internazionali. In Italia, ACCREDIA (Ente Italiano di Accreditamento) opera sotto la vigilanza del Ministero dello Sviluppo Economico ed è l'unico organismo nazionale autorizzato dallo Stato a svolgere attività di accreditamento, attestando che gli organismi di certificazione ed ispezione, i laboratori di prova e quelli di taratura abbiano le competenze per valutare la conformità dei prodotti, dei processi e dei sistemi agli standard di riferimento.

Si distinguono le etichette di:

- Tipo I basata sul sistema multicriterio

che considera l'intero ciclo di vita (LCA, *Life Cycle Assessment*) del prodotto [24]. È emessa mediante dichiarazione di conformità da parte di un ente certificatore riconosciuto (in Italia è l'ISPRA), che effettua test in laboratori accreditati. Nel caso dell'etichetta ecologica (dall'inglese *ecolabel*) è garantito un minimo impatto ambientale durante il LCA del prodotto o di parte di esso. *Ecolabel* UE è stato istituito nel 1992 dal Regolamento n. 880/92 ed è oggi disciplinato dal Regolamento (CE) n. 66/2010 in vigore nei 28 Paesi dell'UE [25].

- Tipo II è un'auto-dichiarazione del produttore che contiene dati informativi sul prodotto, quali ad esempio biodegradabilità, riciclabilità, atossicità, disassemblabilità, ecc. [26].
- Tipo III sono le Dichiarazioni Ambientali di Prodotto DAP o EPD [27], fornite da organizzazioni specifiche e basate su parametri predeterminati (PRC, *Product Category Rules*) e forniscono informazioni di tipo quantitativo sulle performance ambientali del prodotto considerando l'intero ciclo di vita (LCA) [28].

Qualora l'azienda produttrice non fosse in possesso di tali certificazioni, è ammesso presentare un rapporto di ispezione rilasciato da un organismo in conformità alla norma ISO/IEC 17020:2012 [29], che attesti il contenuto di materia recuperata o riciclata nel prodotto. L'efficacia dei CAM è stata assicurata grazie all'art. 18 della L. 221/2015 [30] e, successivamente,

all'art. 34 recante "Criteri di sostenibilità energetica e ambientale" del D.Lgs. 50/2016 "Codice degli appalti" (modificato dal D.Lgs 56/2017) [31], che ne hanno reso obbligatoria l'applicazione da parte di tutte le stazioni appaltanti. Ciò che è obbligatorio per la commercializzazione dei prodotti da costruzione è fissato dal Regolamento Europeo n. 305/2011/CE che impone la marcatura CE a garanzia che le opere di costruzione, nel complesso e nelle loro singole parti, siano adatte all'uso cui sono destinate, assicurando la salute e la sicurezza delle persone interessate durante l'intero ciclo di vita [32].

L'obiettivo della marcatura CE nel quadro del Regolamento sui prodotti da costruzione è quello di garantire che informazioni affidabili sulle prestazioni dei prodotti siano presentate in modo armonizzato in tutta Europa. L'intenzione è quella di sostituire i sistemi di approvazione nazionali con la marcatura CE e di facilitare il commercio transfrontaliero.

Ciò si ottiene fornendo un linguaggio tecnico comune i cui dettagli sono specificati principalmente negli standard di prodotto europei armonizzati che devono essere utilizzati dai produttori e dalle autorità pubbliche per stabilire le prestazioni dei prodotti da costruzione. I requisiti effettivi (valori limite, classi di prestazione) sono specificati da ciascun Stato membro dell'UE. Il regolamento sui prodotti da costruzione non autorizza la Commissione Europea ad armonizzare i requisiti; ciò può avvenire solo su base volontaria previo accordo tra i governi nazionali coinvolti.

Apponendo la marcatura CE su un prodotto, il fabbricante dichiara ed è responsabile che

il prodotto è conforme ai cosiddetti requisiti essenziali del regolamento ad esso applicabile e che tale conformità è stata valutata come specificato nelle relative norme di prodotto. I prodotti recanti il marchio CE beneficiano quindi della libera circolazione nel mercato europeo.

L'Italia recepisce la normativa Europea mediante il D.Lgs. 16 giugno 2017, n. 106 che adegua la normativa nazionale alle disposizioni del Regolamento (UE) n. 305/2011 [33] e le Norme Tecniche delle Costruzioni [34] (NTC, 2018) che regolano il rapporto tra certificazione e prescrizioni nazionali in tema di sicurezza, identificando:

A) materiali e prodotti per i quali sia disponibile una norma europea armonizzata il cui impiego nelle opere è possibile soltanto se corredati della "Dichiarazione di Prestazione" e della Marcatura CE, prevista al Capo II del Regolamento UE 305/2011;

B) materiali e prodotti per i quali non sia disponibile una norma europea armonizzata e sia invece prevista la qualificazione con le modalità e le procedure indicate nelle presenti norme;

C) materiali e prodotti non ricadenti in una delle tipologie A o B per i quali il fabbricante dovrà pervenire alla Marcatura CE sulla base della pertinente "Valutazione Tecnica Europea" (ETA).

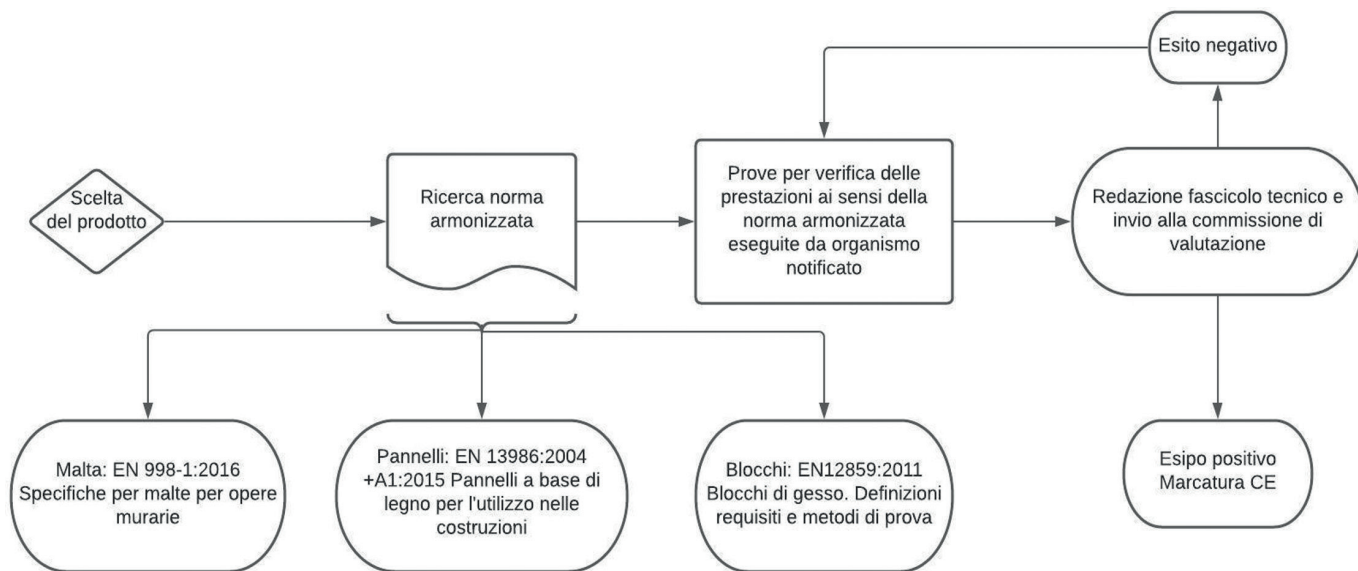
Nel primo caso A, per l'ottenimento della marcatura CE il fabbricante deve predisporre un fascicolo tecnico comprensivo di: dichiarazione di prestazione (DOP), etichetta CE, manuale d'uso e manutenzione, descrizione delle

Diagramma di flusso
esemplificativo del pro-
cesso utile all'ottenimen-
to del marchio CE.

Fonte: Immagine dell'au-
trice E. Nicolini

componenti e dei materiali utilizzati, elenco dei fornitori, analisi dei rischi, disegni tecnici, relazioni di calcolo, documentazione fotografica, eventuali test di prova se richiesti dalla legge e procedure di controllo di produzione e collaudo. Si riporta di seguito un diagramma di flusso che descrive sinteticamente il processo per l'ottenimento del marchio CE, riportando a titolo esemplificativo alcune norme armonizzate su tre differenti prodotti di costruzione (malta per opere murarie, pannelli a base di legno, blocchi di gesso). Le norme di prodotto armonizzate contengono l'allegato ZA nel quale sono riportati i requisiti minimi per dimostrare la conformità alla norma di riferimento, nonché le prove iniziali da effettuare e i Sistemi di Valutazione e Verifica della Costanza di Prestazione (VVCP) previsti per uno specifico prodotto e per una specifica destinazione d'uso. Il VVCP è finaliz-

zato a garantire l'esattezza, l'affidabilità e la comparabilità delle informazioni sulle prestazioni di un prodotto da costruzione. Nell'allegato ZA è specificato il sistema VVCP per ciascuna caratteristica essenziale del prodotto. I sistemi VVCP variano da 1+, 1, 2+, 3 a 4, in ordine di severità decrescente: 1+ caratteristiche che possono avere gravi conseguenze sulla sicurezza, sulla salute e sull'ambiente, 4 caratteristiche che possono avere minime conseguenze. Se tutte le caratteristiche rientrano nel sistema VVCP 4 non è necessario contattare un organismo di certificazione notificato (ente di certificazione e/o laboratorio di prova autorizzato dall'Autorità Governativa Nazionale e notificato alla Commissione Europea) per il controllo di produzione in fabbrica (CPF), l'ispezione dell'impianto e prove su campioni [35].



Se i prodotti rientrano nel sistema 1, 1+ o 2+ l'organismo notificato può collaborare con il fabbricante durante la valutazione ed espletterà alcuni compiti presso l'impianto di produzione del fabbricante. A valle del VVCP, mediante la dichiarazione di prestazione il produttore si assume la responsabilità della conformità del prodotto da costruzione ai requisiti previsti dalle norme armonizzate di riferimento. Se il fascicolo tecnico è valutato positivamente, insieme al marchio CE, è attribuito un codice di identificazione unico del prodotto.

In assenza di norma armonizzata ma in presenza di riferimenti normativi nazionali (quali le NTC 2018), (caso B), il prodotto può essere qualificato con le modalità e le procedure indicate nelle norme seguendo l'iter procedurale di verifica delle prestazioni, ma non potendo applicare il marchio CE. Tali prodotti devono ugualmente rispondere alle caratteristiche essenziali richiamate dal Regolamento UE: resistenza meccanica e stabilità; sicurezza in caso di incendio; igiene, salute e ambiente; sicurezza e accessibilità nell'uso; protezione contro il rumore; risparmio energetico e ritenzione del calore; uso sostenibile delle risorse naturali [36].

In assenza di qualsiasi tipo di norma, o per prodotti che non rientrano interamente in una norma armonizzata (caso C), il fabbricante può richiedere volontariamente la marcatura CE, predisponendo il Documento per la Valutazione Europea (EAD) [37] e richiedendo il rilascio di una Valutazione Tecnica Europea (ETA), da parte di un Organismo di Valutazione Tecnica Designato (TAB) [38]. Alcuni prodotti sono già coperti da uno degli attuali EAD, disponibile

nell'elenco sul sito web della Commissione europea nello spazio denominato "New Approach Notified and Designated Organisations information system" (NANDO) [39], banca dati dove è presente anche l'elenco dei TAB designati da ciascun paese dell'Unione Europea per valutare la conformità dei prodotti al fine di essere immessi nel mercato. Con il D.lgs. 106/2017 è stato istituito l'*Italian Technical Assessment Body*, ovvero l'unico TAB a livello nazionale designato per la redazione del Documento per la Valutazione Europea e per il rilascio della Valutazione Tecnica Europea [40], a cui fanno capo tutte le aree di prodotto (di cui Allegato IV del Regolamento UE).

3.4 Buone pratiche in atto e sperimentali sui prodotti bio-based per l'edilizia

La riduzione del consumo di suolo e di risorse lapidee, degli scarti, la limitazione dell'utilizzo di materiali di cava naturali sono solo alcuni benefici che hanno indotto la comunità scientifica a investire nell'uso di materie prime-seconde di origine vegetale, ecosostenibili; oggi, lo stato dell'arte è molto ricco. La ricerca scientifica è ampiamente indirizzata verso l'applicazione di differenti scarti di natura organica per la produzione di svariate tipologie di materiali e componenti da costruzione: pannelli isolanti, fonoassorbenti e di rivestimento, pannelli truciolare e biocompositi, pavimenti laminati. Inoltre, esistono diverse sperimentazioni incentrate su intonaci con prestazioni termiche aumentate [41]. Il settore delle malte, dei premi-

scelati e dei conglomerati, così come quello dei componenti, presenta plurimi ed ampi scenari di riutilizzo [42].

La comunità scientifica è in fermento per via delle potenzialità d'uso e prestazionali e il mercato è molto interessato essendo questi materiali, e quelli di loro derivazione, certamente bio-compatibili ed ecologici. Il loro uso infatti porta, oltre che ad un beneficio dovuto all'innovazione e all'origine naturale, anche una forte riduzione degli scarti che altrimenti dovrebbero essere avviati a discarica o ad usi di riciclo meno pregiati anche se altrettanto efficaci.

Le ricerche attuali sono finalizzate a facilitare la collocazione sul mercato dei prodotti bio-based con prestazioni certe, verificandone la potenzialità produttiva, la congruità d'uso nell'edilizia, la standardizzazione e codificazione di prestazione, comportamenti, specifiche tecniche, l'LCA, la possibilità di certificazione a tutti i livelli. Particolare attenzione si pone all'eventuale tossicità, al degrado biologico, al mantenimento nel tempo delle caratteristiche con specifiche di manutenzione in fase di esercizio che si prefigurano diversi da quelli dei materiali convenzionali e che potrebbero comprometterne la competitività nel mercato.

Sebbene vi siano ambiti, già avviati nel riciclo e riuso di tali scarti, quali, ad esempio, l'industria del design e degli imballaggi, che presentano casi e prassi consolidate, non si osserva, infatti, una codificazione degli scarti organici che ne possa descrivere le caratteristiche prestazionali e l'evoluzione nel tempo. Inoltre, rimangono dubbi in particolare su due aspetti: la

vulnerabilità ai fattori di degrado e la tenuta delle prestazioni nel tempo.

Tra i prodotti sperimentali, diversi sono costituiti da sottoprodotti organici, ad esempio provenienti dall'agricoltura, che si prestano per le proprietà fisiche e meccaniche come aggregato, matrice o fibra per produrre vari elementi tecnologici nel settore delle costruzioni. Gli scarti più utilizzati sono materiali lignocellulosici, poco costosi, rinnovabili e facilmente reperibili che hanno basso peso specifico. Alcuni studi dimostrano che il contenuto di zucchero in alcuni materiali organici contribuisce all'auto-legame delle particelle, dimostrando che è tecnicamente possibile ottenere prodotti senza legante [43].

3.4.1. Pannelli bio-compositi

Recentemente le fibre vegetali e organiche sono state utilizzate per sostituire le fibre minerali o sintetiche per produrre pannelli a base biologica.

Il contributo principale delle sperimentazioni in atto consiste nel dimostrare che la capacità di assorbimento dell'umidità e le prestazioni dei materiali igroscopici a base biologica possono influenzare in modo significativo il benessere dell'ambiente indoor. La capacità di assorbimento di umidità all'interno di un edificio ha una conseguenza diretta sul miglioramento naturale della qualità dell'aria. Una delle prime ricerche in questo senso è stata condotta presso l'Istituto di fisica delle costruzioni di Fraunhofer (Germania) e dall'Università di Lund (Svezia) nel 1960.

Uno studio che ha confrontato l'assorbimento dell'umidità di un pannello isolante a base di midollo di mais rispetto ad uno in polistirene espanso (EPS) ha mostrato una capacità di assorbimento del primo pari sette volte in più. Tuttavia, per beneficiare di questa capacità di assorbimento dell'umidità è necessario garantire la traspirabilità del materiale. All'interno di un involucro edilizio non ventilato le prestazioni, sebbene risultino sempre maggiori rispetto al pannello di EPS, diminuiscono di più del 50% [44].

Molte altre ricerche sono state condotte anche sull'uso di sottoprodotti delle colture nelle applicazioni edili, sebbene tali ricerche non abbiano condotto alla realizzazione di prodotti commerciali. Sono sperimentati, ad esempio, pannelli con paglia di riso, fibra di cocco, guscio di arachidi, paglia, gambi o bucce di cereali [45]. La maggior parte di queste ricerche però analizza soltanto le prestazioni meccaniche.

L'uso di particelle o fibre vegetali come canne di canapa o di lino per pannelli hanno buone prestazioni termoisolanti e fonoassorbenti. Per quanto riguarda le emissioni di batteri e composti organici volatili (VOC), i risultati sperimentali hanno mostrato che per questo tipo di pannelli sono trascurabili [46]. Inoltre, gli isolanti a base di canapa beneficiano della naturale proprietà ipoallergenica della pianta di canapa stessa.

Sono state studiate le proprietà termiche di pannelli sandwich legno-sughero con diversi spessori [47]. In tale sperimentazione il sughero ha mostrato buone proprietà termiche (conduttività termica $\lambda = 0,041 \text{ W/m K}$, calore spe-

cifico $C_p = 1,9 \text{ J/gK}$) con una diminuzione progressiva della conduttività termica all'aumento dell'assorbimento di vapore acqueo.

La verifica di assorbimento di emissioni inquinanti da parte di pannelli di gesso ha dimostrato, oltre una capacità di assorbimento rilevante dell'umidità relativa, una significativa riduzione della concentrazione di formaldeide [48].

Sono stati prodotti nuovi pannelli in fibrocemento contenenti fibra di cocco e fibre di palma da olio per applicazioni nell'edilizia residenziale. La giusta proporzione di miscela per la produzione delle lastre piane, per ottimizzare il loro isolamento termico, include fibra di cocco o fibra di palma da olio con un rapporto in peso fino al 10% rispetto al legante [49]. Le lastre hanno prodotto un aumento della porosità e una diminuzione della densità pur mantenendo le prestazioni meccaniche previste da normativa. L'aggiunta delle fibre ha ridotto la conduttività termica dei pannelli.

Un'analisi che ha eseguito test sperimentali su 10 pannelli isolanti bio-based e con 4 diversi tipi di isolamento in canapa, lana di legno, residui di segheria, fibra di legno, paglia, sughero isolato e polietilene tereftalato ha dimostrato che i materiali bio-based reagiscono nel modo più efficace ed efficiente ai cambiamenti termoigrometrici. I campioni sono stati esposti a cicli di umidità relativa del 75% e del 53% per 8 e 16 ore (fino a 22 cicli) ed è stato riscontrato che i campioni di canapa, lana di legno e residui di segheria hanno valori di assorbimento dell'umidità migliori (da 1 a 2 $\text{g/m}^2 \text{ \%UR}$) e, inoltre, ri-

spondono in modo dinamico ai cambiamenti termoigrometrici [41].

In termini di emissioni di COV, non c'è molta differenza tra i tradizionali materiali isolanti come lana di roccia minerale, fibra di vetro o polistirene espanso/estruso (EPS/XPS) e quelli di origine biologica [50]. La differenza emerge solo entro il primo mese della posa in opera, durante il quale le emissioni dei materiali bio-based è sensibilmente minore.

Alcuni materiali isolanti a base biologica beneficiano anche delle loro proprietà naturali intrinseche, sebbene l'effetto di queste possa essere limitato dal fatto che gli isolamenti sono, in genere, non direttamente esposti all'aria. L'isolamento in lana, ad esempio, è in grado di purificare l'aria interna grazie alla presenza di gruppi amminici altamente reattivi con COV come la formaldeide [51].

Le fibre vegetali di cui si possono comporre i bio-materiali sono raggruppate in diverse categorie e possono essere classificate in base alla loro origine e derivazioni di piante. Le prestazioni dei prodotti compositi fibro-rinforzati dipendono da diversi fattori, tra cui la composizione chimica delle fibre, le dimensioni cellulari, i difetti, la struttura, le proprietà fisiche e meccaniche e anche l'interazione di una fibra con il polimero [52]. Per ampliare l'uso delle fibre vegetali per i compositi e migliorarne le prestazioni, è essenziale conoscere le caratteristiche della fibra. Le fibre vegetali sono costituite da cellulosa, emicellulosa, lignina, pectina e cera. Le concentrazioni di questi componenti dipendono da fattori quali il tipo di fibra, le condizioni di crescita, le dimensioni, l'età, la

posizione sulla pianta, il metodo di estrazione e lavorazione. La tabella n. 3 mostra le variazioni nella composizione chimica di alcune fibre che potrebbero essere considerate nella sperimentazione dei pannelli bio-compositi.

Ultimamente è in discussione la tecnologia di accumulo di energia termica (TES) che facilita l'acquisizione e l'immagazzinamento dell'energia (calore) in condizioni di bassa richiesta e di fornirla rilasciandola quando la domanda diventa elevata. Pertanto, TES è considerata una delle tecnologie più promettenti per migliorare le prestazioni termiche dell'involucro edilizio.

L'energia termica nei sistemi TES può essere immagazzinata come calore da tre diverse forme: calore sensibile, calore latente e accumulo di calore termochimico. L'energia termica disponibile viene immagazzinata in un solido o liquido (Phase Changing Materials – PCM) aumentandone la temperatura che durante la fase di stoccaggio subisce un cambiamento di fase da solido a liquido o da liquido a gas o viceversa [53]. I PCM vengono incorporati all'interno dei materiali edili attraverso varie tecniche; le più diffuse sono l'impregnazione e il micro-incapsulamento. Questa tecnologia risulta particolarmente vantaggiosa se applicata all'edilizia leggera, in particolare in acciaio e vetro che potrebbero presentare una bassa inerzia termica. Le paraffine sono attualmente i PCM più studiati per le applicazioni TES ma si tratta di un materiale a base di petrolio, altamente inquinante e non rinnovabile. I PCM biobased sono materiali derivati dalla produzione del settore agroalimentare e dai suoi sottoprodotti, inclusi materiali per uso alimentare come olio

Tabella 3 Composizione chimica delle possibili fibre vegetali utilizzabili nei prodotti biocompositi

Fibra	Cellulosa (%)	Emicellulosa (%)	Lignina (%)	Pectina (%)	Cera (%)
Abaca	62.5	21	12	0.8	3
Alfa	45.4	38.5	38.5	–	2
Areca	57.35–58.21	13–15.42	23–24	–	0.12
Bagassa	37	21	22	10	–
Bambù	34.5	20.5	26	–	–
Banana	62.5	12.5	7.5	4	–
Orzo	31–45	27–38	14–19	–	2–7
Cocco	456	0.3	45	4	–
Mais	38–40	28	7–21	–	3.6–7
Cotone	89	4	0,75	6	0.6
Curaua	73.6	5	7.5	–	–
Eucalipto	41.7	32.56	25.4	8.2	0,22
Lino	72.5	14.5	2.5	0.9	–
Canapa	81	20	4	0.9	0.8
Henequé	60	28	8	–	0,5
Ibisco	28	25	22.7	–	–
Isora	74	–	23	–	1.1
Iuta	67	16	9	0.2	0,5
Kenaf	53.5	21	17	2	–
cromo	67	30	11	–	–
Ananas	80.5	17.5	8.3	4	–
Ramiè	72	14	0.8	2	–
Buccia di riso	28–36	23–28	12–14	–	14–20
Sisal	60	11.5	8	1.2	–
sorgo	27	25	11	–	–
Grano	33–38	26–32	17–19	–	6.8
Eucalipto	41.7	32.56	25.4	8.2	0,22
Lino	72.5	14.5	2.5	0.9	–

Fonte: Ramesh, M., et. Al. 2017

di palma, olio di cocco e olio di soia [54]. Altre alternative ecologiche sono: olio da cucina esausto, oli vegetali non commestibili, grasso animale di scarto. I PCM a base biologica come gli esteri degli acidi grassi sono ancora in fase di sperimentazione. L'ottimizzazione dei pannelli a base biologica con tale tecnologia è stata studiata solo in parte; le conoscenze sulle caratteristiche igroscopiche associate a questi materiali non sono completamente padroneggiate.

3.4.2. *Malte e intonaci a base biologica*

Gli intonaci e i rivestimenti a base biologica possono incidere fortemente sulla qualità dell'ambiente interno poiché occupano ampie superfici a diretto contatto con l'aria interna.

La maggior parte delle sperimentazioni in atto sui prodotti bio-based includono intonaci a base di calce e argilla. Come visto per i materiali isolanti bio-based, anche gli intonaci a base naturale garantiscono un'elevata traspirabilità grazie alla loro struttura porosa igroscopica e, di conseguenza, anche in questo caso si può affermare l'importante correlazione tra l'assorbimento di umidità relativa e il miglioramento della qualità dell'aria interna [55]. Questo tipo di intonaco può, inoltre, rilasciare l'umidità in un secondo momento ovvero quando il valore del tasso di umidità nell'aria è inferiore rispetto a quello contenuto nel materiale, fino a creare un equilibrio.

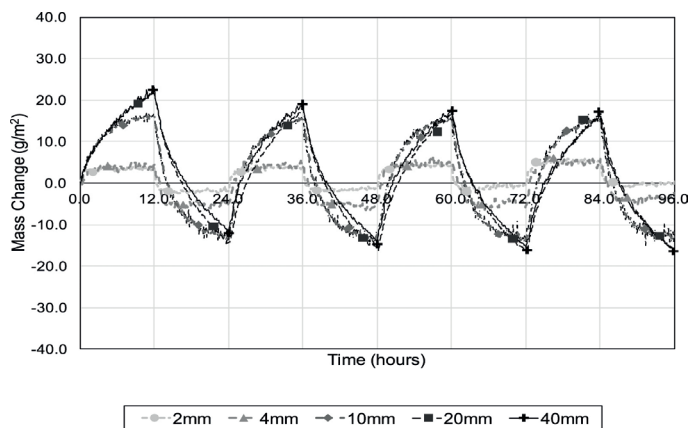
È stata osservata la capacità di adsorbimento a 21 °C per 24 h di diverse tipologie di intonaco a base naturale concludendo che un intonaco argilloso ha assorbito circa 200 g/m²; gli

intonaci calce-cemento e di gesso hanno adsorbito rispettivamente circa 40 g/m² e 30 g/m² [56].

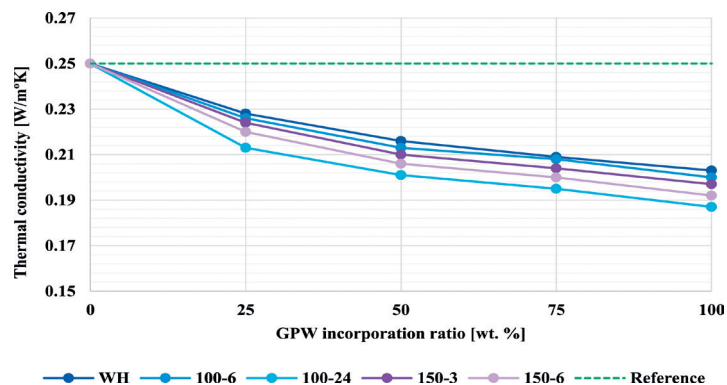
Un intonaco a base di terra cruda è stato confrontato con uno d'uso comune (a base di gesso o cemento) e un altro di terra cruda con aggiunta di calce. Il confronto è in prospettiva della capacità di assorbimento degli inquinanti atmosferici, sempre in relazione alla proprietà igroscopica. I risultati mostrano che gli intonaci a base di terra cruda hanno un'elevata capacità di assorbimento e desorbimento rispetto agli intonaci di uso comune e l'aggiunta di calce aerea alla malta di terra cruda diminuisce la capacità igroscopica [57]. Precedenti studi attribuiscono alla terra cruda la capacità di assorbire e legare gli inquinanti disciolti nell'acqua; da qui si potrebbe dedurre che gli inquinanti presenti nel vapore acqueo possono essere catturati da tali intonaci [58].

Un metodo di valutazione dell'impatto sulla qualità dell'aria degli intonaci a base di argilla senza ausilio di test empirici è stato applicato analizzando la qualità dell'aria percepita (PAQ). Nei casi in cui era presente l'intonaco argilloso, il PAQ era generalmente superiore rispetto a quando non era presente. Per verifica sono state effettuate delle misurazioni delle concentrazioni di ozono prima di stendere l'intonaco a base di argilla (dove era presente un intonaco d'uso comune) ed in seguito la stesura. Le misurazioni hanno confermato l'esattezza del test PAQ: la concentrazione di ozono era diminuita [59].

Riguardo gli intonaci a base di calce è stata dimostrata efficacia anche nell'adsorbimento dei COV. Uno studio, mediante test in camera



a



b

climatica, ha esaminato le proprietà di assorbimento di una miscela di calce e cellulosa ed è stato notato l'assorbimento di formaldeide e di dodecano [60]. In seguito, si è analizzato lo stesso intonaco con un'aggiunta progressiva di bioaggregati e si è notato un miglioramento della capacità di assorbimento proporzionale alle aggiunte degli inerti; ciò ha, però, comportato una riduzione della densità con conseguente riduzione delle proprietà meccaniche dell'intonaco [51].

Bioaggregati recentemente sperimentati sono cocco, bambù o bagassa, in particolar modo in Brasile, paese con una vasta gamma di fibre. Le proprietà degli aggregati vegetali provengono dal fusto delle piante coltivate e dai loro semi. Tali aggregati sono generalmente leggeri, malleabili e molto porosi con una bassa densità apparente. Sono molto diversi dagli aggregati minerali tipicamente utilizzati nei calcestruzzi, per i quali esistono strumenti e tecniche di caratterizzazione standardizzati.

Il comportamento igroscopico delle piante lignocellulosiche è in gran parte dovuto alla porosità utile per condurre i fluidi necessari al loro sviluppo (linfa e acqua) che permane anche dopo il taglio e la lavorazione, il valore tipico della permeabilità all'acqua ottenuto in laboratorio è di circa 100 kg/m³ [61]. Gli studi sugli intonaci a base di gesso e scarti di legno insieme a paglia come rinforzo naturale restituiscono una capacità di assorbimento del vapore acqueo maggiore aumentando la frazione legnosa e, quindi, gli impasti contenenti trucioli di legno sono preferibili rispetto a quelli con segatura in pari percentuale [62]. In un'altra analisi l'intonaco di gesso è mischiato a diverse percentuali di scarti da riciclo di pannelli in cartongesso. All'aumentare della percentuale degli scarti frantumati l'intonaco sviluppa capacità coibenti [63].

Il nucleo legnoso del fusto della pianta di canapa è invece il più diffuso in Europa nei bio-materiali da costruzione; questo viene so-

a. Processo di assorbimento/desorbimento dell'umidità di un intonaco bio-based a base di argilla.
Fonte: Maskell, D., et. al., 2018 [58]

b. Miglioramento della prestazione di isolamento termico di intonaci a base di gesso all'aumentare del contenuto di rifiuti derivanti dalla dismissione di pannelli in cartongesso (GWP-Gypsum plasterboard waste).
Fonte: Pedreno-Rojas, M. A., et al., 2019 [63]

litamente miscelato con un legante a base di calce e il bio-calcestruzzo risultante è noto come canapa-calce. La caratterizzazione di questi aggregati, tuttavia, fondamentale per una corretta comprensione della qualità dei materiali in cui sono incorporati, è complessa poiché richiede l'adeguamento delle tecniche usualmente impiegate per gli aggregati minerali, o l'elaborazione di nuove procedure di caratterizzazione.

La capacità di assorbimento dinamico combinato (capacità di assorbimento dell'umidità e degli inquinanti) di materiali a base biologica come il calcestruzzo di calce di canapa consente di ridurre, nell'ambiente interno, il livello di concentrazione di inquinanti (toulene) nonché l'umidità relativa [64]. Sono diverse le ricerche che dimostrano le proprietà fisiche (conducibilità termica, capacità termica, capacità igroscopica) della miscela con canapa. Inoltre, gli intonaci isolanti a base di canapa beneficiano della naturale proprietà ipoallergenica della pianta di canapa stessa. Il confronto tra un ambiente rivestito con un calcestruzzo a base di canapa e uno con cemento

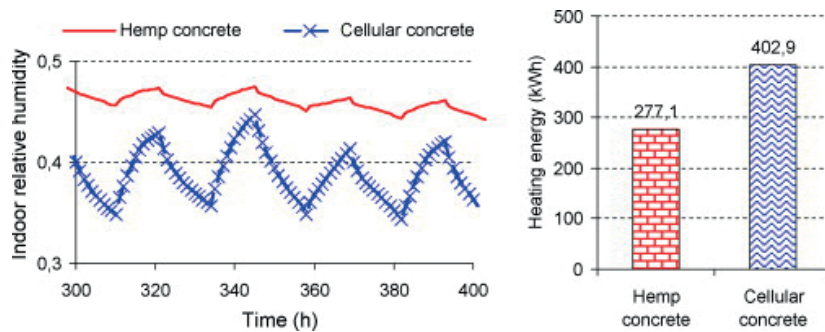
cellulare mostra una riduzione del 45% dell'energia consumata per il riscaldamento, ciò dovuto alla minore conduttività termica del calcestruzzo di canapa.

Alcuni intonaci bio-compositi sono sperimentati con l'uso di fibre di lino, palma e girasole; tutti materiali che hanno una porosità molto elevata. Sono prodotti che miscelano inerti a base biologica, leganti (cemento, calce, ecc.) e acqua.

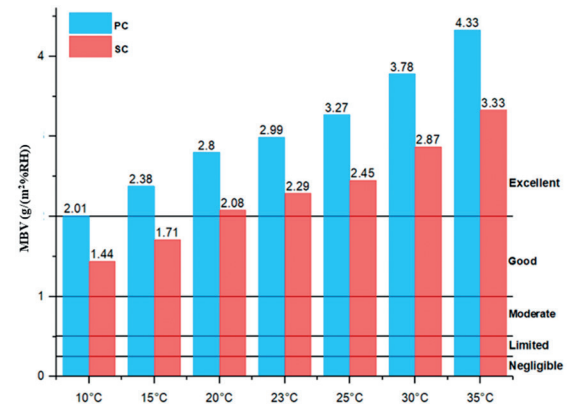
Sono state eseguite delle simulazioni sulle prestazioni igieniche dei calcestruzzi di palma e girasole installati su una superficie di 37 m² delle pareti interne di un edificio ed esposti direttamente a contatto con l'ambiente interno. I risultati confermano un impatto significativo sul comfort termoigrotermico interno con un'ottima capacità di assorbimento di umidità relativa del pannello che incrementa all'aumentare del valore della temperatura [65]. Uno studio precedente aveva restituito un valore di assorbimento di una miscela a base di calce e palma pari a 2,96 e 2,03 g/(m²%UR) rispettivamente misurati a 23 °C e 10 °C.

a. Variazione dell'umidità relativa interna e dell'energia di riscaldamento per la stanza in cemento di canapa e per la stanza in cemento cellulare.
Fonte: Tran Le, A.D., et al., 2010 [64]

b. Influenza della temperatura sulla capacità di assorbimento di umidità da parte del calcestruzzo a base di palma (PC) e di quello a base di girasole (SC).
Fonte: Igue, F. D., et al., 2021 [65]



a.



b.

Altre sperimentazioni riguardano l'uso del gesso insieme a scarti di legno come aggregati sia nelle malte cementizie che negli intonaci, da tali studi sono state ottenute miscele più leggere con proprietà termiche e acustiche migliorate.

Sono numerose le sperimentazioni con scarti organici, ad esempio, si sono prodotti nuovi calcestruzzi che si compongono di cenere di lolla di riso come sostituto parziale del cemento [66]. Lo stesso residuo è stato impiegato anche per la realizzazione di nuove malte cementizie e intonaci di gesso. In questi casi, però, l'aggiunta di materiale organico ha favorito le prestazioni meccaniche a sfavore di quelle igroscopiche a causa dell'estrema finezza delle particelle granulometriche della cenere che hanno saturato i pori.

La lolla di riso è uno scarto agricolo ricco di silice che risulta dall'estrazione dei chicchi di riso, i paesi che più producono questa risorsa sono Cina e Portogallo. Le ceneri di lolla di riso possono essere utilizzate come pozzolana artificiale, sostituendo parzialmente la calce o il cemento nelle malte e nei calcestruzzi. La buccia di riso residua è, in genere, utilizzata per compositi a base di gesso. Alcuni studi hanno testato la resistenza alla crescita fungina di un composito di terra contenente lolla di riso, rispetto ad altri compositi di terra di fibre vegetali, quali paglia d'orzo. I compositi di lolla di riso sembrano avere un'ottima resistenza alle muffe [67].

Gli intonaci a base di terra cruda sono classificati buoni isolanti termici per la loro struttura porosa, seppur con caratteristiche mecca-

niche non sufficienti. Per questo, alcune sperimentazioni hanno provato a rinforzare la terra con fibre, granulati, ecc.; tra queste, uno studio relativo ad un intonaco di terra e paglia d'orzo, ha concluso che l'aumento del contenuto di paglia negli intonaci di terra ha ridotto la conduttività termica a quasi la metà [68]. Questo risultato è in accordo con altre ricerche sul tema.

3.4.3 *Materiali strutturali a base biologica*

I materiali da costruzione a base biologica più diffusi sono legno, terra cruda e terra stabilizzata. Per quanto riguarda i materiali da costruzione a base di legno, sebbene vi siano variazioni significative tra i diversi prodotti, è stato dimostrato che sono alcuni dei principali contributori all'emissione indoor di alcuni composti organici volatili come aldeidi e terpeni [69]. Ciò è dovuto principalmente alle resine leganti contenenti formaldeide, presente, ad esempio, nel pannello compensato o MDF, ma anche in parte alla natura organica di questo materiale. In questo senso, si può ritenere che i materiali da costruzione a base di legno abbiano effetti negativi sulla qualità dell'aria interna, ma le ricerche associano emissioni di COV principalmente subito dopo la loro posa in opera e le emissioni in condizione di regime stazionario sono al di sotto della maggior parte delle soglie consentite. Inoltre, secondo studi recenti, alcuni dei COV emessi dai prodotti in legno hanno effettivamente dimostrato di presentare alcuni benefici per la salute umana. Ad esempio, composti come l' α -pinene e il d-limonene svolgono

un ruolo nel rilassamento fisiologico e nell'abbassamento della pressione sanguigna, mentre i monoterpeni hanno proprietà antimicrobiche, antinfiammatorie, antipruriginose, analgesiche e antistress [70]. Tra i vantaggi, la natura igroscopica del legno consente l'assorbimento e il desorbimento del vapore acqueo. È dimostrato che la regolazione dell'umidità delle strutture in legno igroscopiche può migliorare la percezione della qualità dell'aria da parte degli utenti (PAQ) fino al 25% in più rispetto ad una struttura impermeabile [71].

Anche la terra ha caratteristiche igrotermiche. Numerosi studi hanno riportato i vantaggi di questo materiale, sostenendo un'influenza significativa sulla qualità dell'aria interna.

Le strutture in terra stabilizzata sono costituite dal suolo nella sua fase minerale esclusa la fase organica solitamente presente nei primi strati. Il processo di stabilizzazione si basa sull'essiccamento e compattamento, senza l'uso di alcun legante chimico. Pertanto, contrariamente ad altri materiali da costruzione a base biologica, la struttura in terra stabilizzata non emette alcun COV, contribuendo a migliorare l'IAQ, sempre grazie alla proprietà igroscopica.

I cicli di assorbimento e desorbimento, tipici della terra, hanno un effetto rinfrescante sulle condizioni interne e la struttura porosa può garantire una buona inerzia termica. Tra gli svantaggi vi sono la sua scarsa duttilità e resistenza all'acqua e per farvi fronte alcune ricerche associano la terra a fibre naturali e un basso contenuto di leganti. Tuttavia, l'uso di fibre naturali può aumentare la suscettibilità allo sviluppo biologico.

Sono in corso metodi sperimentali per lo studio della crescita della muffa nei materiali a base biologica di terra. Varie condizioni climatiche sono state testate su campioni di terra con e senza paglia. È stata dimostrata che la terra con paglia è più sensibile alla crescita dei funghi. La crescita fungina è avvenuta dopo quattro settimane di esposizione al 93% di umidità relativa e 30 °C attivata dall'acqua in stato liquido, non dal vapore. Per la terra senza aggregati vegetali la crescita fungina è stata osservata per la prima volta dopo otto settimane di incubazione nelle stesse condizioni [72]. Condizioni però troppo umide, difficili da riscontrare in un ambiente indoor.

Da altre ricerche si deriva che l'aggiunta di aggregati naturali ai compositi di terra porta ad una minore densità apparente, diminuendo la conducibilità termica e migliorando, così, le prestazioni isolanti (come precedentemente visto nel caso di intonaci a base di terra).

Una sperimentazione ha esaminato una matrice terrosa stabilizzata con un contenuto di lolla di riso, di gesso semiidrato e di calce aerea rispettivamente del 20% e del 10% rispetto al volume della terra [73]. Sono stati prodotti due campioni compositi con il 15% e il 30% di lolla di riso. Essendo la lolla di riso riconosciuta come materiale igroscopico e allo stesso tempo imputrescibile l'obiettivo era che la miscela producesse compositi per l'applicazione come rivestimento per interni. L'aumento del contenuto di lolla di riso dal 15% al 30% ha aumentato la capacità igroscopica e diminuito la densità apparente, generando un effetto positivo sulla prestazione isolante. Altri studi sul

composto terra-calce aerea e hanno rilevato che l'aggiunta di calce diminuisce la capacità di assorbimento d'acqua [74] e di conseguenza aumenta la conducibilità termica [75].

Il gesso emiidrato, legante prodotto a temperature molto basse (120–180 °C) e con un'essiccazione molto rapida, viene aggiunto ai com-

positi a base di terra per migliorare la resistenza alla compressione e alla flessione dei compositi]. In riferimento alla conducibilità termica, si è dimostrato che l'aggiunta di gesso ha ridotto la conduttività termica della terra e quindi potrebbe incidere positivamente sul comfort termico in spazi confinati [76, 77].

Tabella 4. Composizioni dei suoli e degli aggregati vegetali o delle fibre utilizzate più frequentemente nelle sperimentazioni di materiali bio-compositi fibrorinforzati a base di terra cruda

Suoli						Aggregati vegetali o fibre			
wL (%)	wP (%)	PI (%)	Argilla (%)	Limo (%)	Sabbia (%)	Tipo	Lunghezza (cm)	Contenuto (in peso%)	(in
23	20	3	60			Paglia, rami di legno pregiato		0,23	
			9	18	73	Cocco	3,5 o 5	0,8–3,2	
30	24	6				Sisal, fibra di cocco	5	4	
			25			Cannuccia	5	0–1	
47	16	31	49			Paglia di grano		1	
38	20	18	25	30	45	Ibisco cannabinico	3–6	0,2–0,8	
26	18	8	22	50	25	Cannuccia	5	0–1	
			10	5	85	Segatura, sterco di vacca, melassa		0–20 (in volume)	
			15	25	60	Paglia di grano	5	0,7–3,8	

Fonte: Laborel-Préneron, A., et. al. 2016

Bibliografia

1. United Nations, Sustainable Development Goals, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals>
2. Savio, L., Bosia, D., Patrucco, A., Pennacchio, R., Piccablotto, G., Thiebat, F., *Applications of Building Insulation Products Based on Natural Wool and Hemp Fibers*, in *Advances in Natural Fibre Composites*, **2018**, pp. 237-247
3. Kylili A., Fokaides P.A., *Policy trends for the sustainability assessment of construction materials: A review*, *Sustainable Cities and Society* 35, **2017**, pp. 280-288.
4. Giglio, F., Lauria, M., Lucarelli, M. T., *Beyond the culture of waste, towards circular processes*, in *TECHNE-Journal of Technology for Architecture and Environment*, **2021**, pp. 16-21
5. Spengler, J. D., & Chen, Q., *Indoor air quality factors in designing a healthy building*, in *Annual Review of Energy and the Environment*, 25(1), **2000**, pp. 567-600.
6. Srivastava, V., Vaish, B., Singh, R. P., Singh, P., *An insight to municipal solid waste management of Varanasi city, India, and appraisal of vermicomposting as its efficient management approach* in *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(3), **2020**, pp. 1-23.
7. Zomorodian, Z. S., Tahsildoost, M., Hafezi, M., *Thermal comfort in educational buildings: A review article*, in *Renewable and sustainable energy reviews*, 59, **2016**, pp. 895-906.
8. World Health Organization, *WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants*. Regional Office for Europe, **2010**.
9. Repubblica Italiana, Ministero della salute, *Principali inquinanti indoor e le loro fonti*, https://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_6.jsp?id=4389&area=indor&menu=vuoto
10. Levin, H., *Building materials and indoor air quality*. *Occupational Medicine (Philadelphia, Pa.)*, 4(4), **1989**, pp. 667-693.
11. ISPRA-Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, *Inquinamento indoor: aspetti generali*, **2010** <https://www.isprambiente.gov.it/contentfiles/00010300/10392-rapporto-117-2010.pdf/>
12. Seng, B., Lorente, S., Magniont, C., *Scale analysis of heat and moisture transfer through bio-based materials—Application to hemp concrete*, in *Energy and Buildings* 155, **2017**, pp. 546-558.
13. Baglioni, A., Piardi, S., Bertoldini, M., Secchi, A. G., Magnoni, M., Nardi, G., Squarcialupi, V., *Costruzioni e salute. Criteri, norme e tecniche contro l'inquinamento interno*, FrancoAngeli, **1986**
14. Uhde, E., Salthammer, T., *Impact of reaction products from building materials and furnishings on indoor air quality—a review of recent advances in indoor chemistry*, in *Atmospheric Environment*, 41(15), **2017**, pp. 3111-3128.
15. Commissione Europea, *Regolamento (UE) n. 305/2011 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 9 marzo 2011 che fissa condizioni armonizzate per la commercializzazione dei prodotti da costruzione e che abro-*

- ga la direttiva 89/106/CEE del Consiglio, Gazzetta ufficiale dell'UE, **2011**.
16. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 16516:2020 Prodotti da costruzione - Valutazione del rilascio di sostanze pericolose - Determinazione delle emissioni in ambiente interno*, **2020**.
 17. International Organization for Standardization, *ISO 16000-9:2006 Indoor air — Part 9: Determination of the emission of volatile organic compounds from building products and furnishing — Emission test chamber method*, **2006**.
 18. Huang, S., Xiong, J., Zhang, Y., *A rapid and accurate method, ventilated chamber C-history method, of measuring the emission characteristic parameters of formaldehyde/VOCs in building materials*, in *Journal of hazardous materials*, 261, **2013**, pp. 542-549.
 19. Liu, X., Mason, M., Krebs, K., Sparks, L., *Full-scale chamber investigation and simulation of air freshener emissions in the presence of ozone*. *Environmental Science & Technology*, 38(10), **2004**, pp. 2802-2812.
 20. Repubblica Italiana, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, *DM 11 ottobre 2017 Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici*, GU Serie Generale n.259 del 06-11-2017, **2017**.
 21. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 636:2015 Pannelli di legno compensato - Specifiche*, **2015**.
 22. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 717-1:2004 Pannelli a base di legno - Determinazione del rilascio di formaldeide - Parte 1: Emissione di formaldeide con il metodo della camera*, **2004**.
 23. Repubblica Italiana, Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, *Decreto 11 ottobre 2017, Allegato: Piano d'azione nazionale sul Green Public Procurement (PANGPP), paragrafo 2.4.1.2 Materia recuperata o riciclata*, Gazzetta Ufficiale n.259 del 06 novembre, **2017**.
 24. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 14024:2018 Etichette e dichiarazioni ambientali - Etichettatura ambientale di Tipo I - Principi e procedure*, **2018**.
 25. Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, *Regolamento (CE) n. 66/2010 de 25 novembre 2009 relativo al marchio di qualità ecologica dell'Unione Europea (Ecolabel)*, Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea del 21 gennaio 2010, **2010**.
 26. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 14021:2016 Etichette e dichiarazioni ambientali - Asserzioni ambientali auto-dichiarate (etichettatura ambientale di Tipo II)*, **2016**.
 27. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 15804:2019 Sostenibilità delle costruzioni - Dichiarazioni ambientali di prodotto - Regole quadro di sviluppo per categoria di prodotto*, **2019**.
 28. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN ISO 14025:2010 Etichette e dichiarazioni ambientali - Dichiarazioni ambientali di Tipo III - Principi e procedure*, **2010**.
 29. Ente Italiano di Normazione, *UNI CEI EN ISO/IEC 17020:2012 Valutazione della con-*

- formità - *Requisiti per il funzionamento di vari tipi di organismi che eseguono ispezioni*, **2012**.
30. Repubblica italiana, *L. 28 dicembre 2015, n. 221 "Disposizioni in materia ambientale per promuovere misure di green economy e per il contenimento dell'uso eccessivo di risorse naturali"*, art. 18 *applicazione di Criteri Ambientali Minimi negli appalti pubblici per le forniture e negli affidamenti di servizi*, Gazzetta Ufficiale n.13 del 18 gennaio 2016, **2016**.
 31. Repubblica italiana, *D. Lgs. 18 aprile 2016 n. 50 "Codice dei contratti pubblici"*, art. 34 *comma 2: Criteri di sostenibilità energetica e ambientale*, Gazzetta Ufficiale del 19 aprile 2016, **2016**.
 32. Parlamento Europeo e il Consiglio dell'Unione Europea, *Regolamento n. 305/2011 del 9 marzo 2011 che fissa condizioni armonizzate per la commercializzazione dei prodotti da costruzione e che abroga la direttiva 89/106/CEE del Consiglio, Allegato I Requisiti di base delle opere di costruzione*, Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea del 4 aprile 2011, **2011**.
 33. Repubblica Italiana, *Decreto Legislativo 16 giugno 2017, n. 106 Adeguamento della normativa nazionale alle disposizioni del regolamento (UE) n. 305/2011, che fissa condizioni armonizzate per la commercializzazione dei prodotti da costruzione e che abroga la direttiva 89/106/CEE*, Gazzetta Ufficiale n. 159 del 10 luglio 2017, **2017**.
 34. Repubblica Italiana, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, *Decreto 17 gennaio 2018 "Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni"*, *Capitolo 11 Materiali e Prodotti per Uso Strutturale, art. 11.1 Generalità*, p. 306, Gazzetta Ufficiale n. 42 del 20 febbraio 2018, **2018**.
 35. Commissione Europea, *La marcatura CE. Prodotti da costruzione passo a passo*. Paragrafo 2.1.2. Sistemi di valutazione e verifica della costanza della prestazione (sistemi VVCP) p. 8, **2015**. <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/12310?locale=it>, consultato il 21/05/2021
 36. Parlamento Europeo e il Consiglio dell'Unione Europea, *op. cit.* Allegato I Requisiti di base delle opere di costruzione, Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea del 4 aprile 2011, **2011**
 37. Commissione Europea, *Elenco dei documenti per la valutazione europea - EAD*. Disponibile su: <https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/nando/index.cfm?fuseaction=cp.eads&cpr=Y>, consultato il 21/05/2021
 38. Commissione Europea, *Elenco degli organismi di valutazione tecnica - TAB*. Disponibile su: https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/nando/index.cfm?fuseaction=directive.notifiedbody&dir_id=33, consultato il 21/05/2021
 39. Commissione Europea, *NANDO - New Approach Notified and Designated Organisations information system*. Disponibile su: <https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/nando/index.cfm>, consultato il 21/05/2021
 40. Repubblica Italiana, *op. cit.* Capo II, Organismo Nazionale per la Valutazione Tecnica

- ca Europea, Gazzetta Ufficiale n. 159 del 10 luglio 2017
41. Romano, A., Riley, M., Bras, A., *Prescriptive Bio-Based Earth Mortar Composites as a Buffer for Internal Thermal Comfort*. *EPiC Series in Built Environment*, 2, **2021**, pp. 626-634.
 42. Mnasri, F., Bahria, S., Slimani, M. E. A., Lahoucine, O., El Ganaoui, M., *Building incorporated bio-based materials: Experimental and numerical study*, in *Journal of Building Engineering* 28, **2020**.
 43. Ferrandez-Villena, M., Ferrandez-Garcia, C. E., Garcia Ortuño, T., Ferrandez-Garcia, A., Ferrandez-Garcia, M. T., *Study of the utilisation of almond residues for low-cost panels*, in *Agronomy*, 9(12), **2019**.
 44. Palumbo, M., Lacasta, A. M., Giraldo, M. P., Haurie, L., Correal, E., *Bio-based insulation materials and their hygrothermal performance in a building envelope system (ETICS)*. *Energy and Buildings*, 174, **2018**, pp. 147-155.
 45. Fiore, V., De Medici, S., Senia, C., *Processi virtuosi: sistemi di copertura in bio-composito per la rigenerazione del territorio*, in *TECHNE: Journal of Technology for Architecture & Environment*, **2018**
 46. Igue, F. D., Tran Le, A. D., Bourdot, A., Promis, G., Nguyen, S. T., Douzane, O., Langlet, T., *Impact of Temperature on the Moisture Buffering Performance of Palm and Sunflower Concretes*, in *Applied Sciences*, 11(12), **2021**.
 47. Limam, A., Zerizer, A., Quenard, D., Sallee, H., Chenak, A., *Experimental thermal characterization of bio-based materials (Aleppo Pine wood, cork and their composites) for building insulation*, in *Energy and Buildings*, 116, **2016**, pp. 89-95.
 48. Matthews, T. G., Hawthorne, A. R., Thompson, C. V., *Formaldehyde sorption and desorption characteristics of gypsum wallboard*, in *Environmental science & technology*, 21(7), **1987**, pp. 629-634.
 49. Lertwattanakul, P., Suntijitto, A., *Properties of natural fiber cement materials containing coconut coir and oil palm fibers for residential building applications*, in *Construction and Building Materials*, 94, **2015**, pp. 664-669.
 50. Chan, M., Ogunjobi, F., *The eco-friendliness of Bio-Structural Insulated Panels (SIPs)*. *AFAANZ*, **2020**.
 51. Maskell, D., da Silva, C. F., Mower, K., Rana, C., Dengel, A., Ball, R. J., Walker, P. J., *Bio-based plaster for improved indoor air quality*, in *Academic Journal of Civil Engineering*, 35(2), **2017**, pp. 637-642.
 52. Ramesh, M., Palanikumar, K., Reddy, K. H., *Plant fibre-based bio-composites: Sustainable and renewable green materials* in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, **2017**, pp. 558-584.
 53. Okogeri, O., Stathopoulos, V. N., *What about greener phase change materials? A review on biobased phase change materials for thermal energy storage applications*, in *International Journal of Thermofluids*, 10, **2021**.
 54. Kang, Y., Jeong, S. G., Wi, S., Kim, S., *Energy efficient Bio-based PCM with silica fume composites to apply in concrete for energy*

- saving in buildings*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 143, 2015, pp. 430-434.
55. Pérez-Gálvez, F., Morales-Conde, M. J., & Pedreño-Rojas, M. A., *Use of Bioceramics Enhanced with Effective Microorganisms as an Additive for Construction. Study of Physical and Mechanical Properties in Cement Mortars and Gypsum Plasters*, in Applied Sciences, 11(8), **2021**.
56. Minke, G., *Building with earth. Design and Technology of a Sustainable Architecture*, 1st edn. Birkhäuser—Publishers for Architecture, **2006**.
57. Gomes, M. I., Lima, J., Santos, T., Gomes, J., Faria, P., *The Benefits of Eco-Efficient Plasters for Occupant's Health—A Case Study*. In Ecological and Health Effects of Building Materials, Springer, **2022**, pp. 383-404.
58. Maskell, D., Thomson, A., Walker, P., Lemke, M., *Determination of optimal plaster thickness for moisture buffering of indoor air*, in Building and Environment, 130, **2018**, pp. 143-150.
59. Darling, E. K., Cros, C. J., Wargocki, P., Kolarik, J., Morrison, G. C., Corsi, R. L., *Impacts of a clay plaster on indoor air quality assessed using chemical and sensory measurements*, in Building and Environment, 57, **2012**, pp. 370-376.
60. Lamble, S. P., Corsi, R. L., Morrison, G. C., *Ozone deposition velocities, reaction probabilities and product yields for green building materials*, in Atmospheric environment, 45(38), **2011**, pp. 6965-6972.
61. Amziane, S., Sonebi, M., *Overview on bio-based building material made with plant aggregate*, in RILEM Technical Letters, 1, **2016**, pp. 31-38.
62. Morales-Conde, M. J., Rodríguez-Liñán, C., & Pedreño-Rojas, M. A., *Physical and mechanical properties of wood-gypsum composites from demolition material in rehabilitation works*, in Construction and Building Materials, 114, **2016**, pp. 6-14.
63. Pedreno-Rojas, M. A., Flores-Colen, I., De Brito, J., Rodríguez-Liñán, C., *Influence of the heating process on the use of gypsum wastes in plasters: Mechanical, thermal and environmental analysis*, in Journal of Cleaner Production, 215, **2019**, pp. 444-457.
64. Tran Le, A.D., Maalouf, C., Mai, T.H., Wurtz, E., Collet, F., *Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope*, in Energy Building, **2010**, pp. 1797-1806
65. Igue, F. D., Tran Le, A. D., Bourdot, A., Promis, G., Nguyen, S. T., Douzane, O., & Langlet, T., *Impact of Temperature on the Moisture Buffering Performance of Palm and Sunflower Concretes*, in Applied Sciences, 11(12), **2021**.
66. Siddique, R., Singh, K., Singh, M., Corinaldesi, V., Rajor, A., *Properties of bacterial rice husk ash concrete*. Construction and Building materials, 121, **2016**, pp. 112-119.
67. Laborel-Préneron, A., Ouédraogo, K., Simons, A., Labat, M., Bertron, A., Magniont, C., Aubert, J. E., *Laboratory test to assess sensitivity of bio-based earth materials to fungal growth*, in Building and Environment, 142, **2018**, pp.11-21.
68. Ashour, A. G., Shaban, W. M., Elbaz, K.,

- Physical and Mechanical Properties of Lime and Wood Ash Plastering Mortars. In *Belt and Road Webinar Series on Geotechnics*, in Energy and Environment. Springer, **2021**, pp. 183-199.
69. Harb, P., Locoge, N., Thevenet, E. F., *Emissions and treatment of VOCs emitted from wood-based construction materials: Impact on indoor air quality*, in Chemical Engineering Journal, 354, **2018**, 641-652.
 70. Son, Y. S., Lim, B. A., Park, H. J., & Kim, J. C., *Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emitted from building materials to improve indoor air quality: focused on natural VOCs*, in Air quality, atmosphere & health, 6(4), **2013**, pp. 737-746.
 71. Simonson, C. J., Salonvaara, M., Ojanen, T., *The effect of structures on indoor humidity--possibility to improve comfort and perceived air quality*, in Indoor air, 12(4), **2012**, pp. 243-251.
 72. Labrel-Préneron, A., Aubert, J. E., Magniont, C., Tribout, C., Bertron, A., *Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review*, in Construction and building materials, 111, **2016**, pp. 719-734.
 73. Antunes, A., Faria, P., Silva, V., Brás, A., *Rice husk-earth based composites: A novel bio-based panel for buildings refurbishment*, in Construction and Building Materials, 221, **2019**, pp. 99-108.
 74. Millogo, Y., Morel, J. C., Aubert, J. E., Ghavami, K., *Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers*, in Construction and Building Materials, 52, **2014**, pp. 71-78.
 75. Lima, J., Faria, P., *Eco-efficient earthen plasters: The influence of the addition of natural fibers*, in NATURAL Fibres: advances in science and technology towards industrial applications, Springer, **2016**, pp. 315-327.
 76. Binici, H., Aksogan, O., Bodur, M. N., Akca, E., Kapur, S., *Thermal isolation and mechanical properties of fibre reinforced mud bricks as wall materials*, in Construction and Building materials, 21(4), **2017**, pp. 901-906.
 77. Ashour, T., Korjenic, A., Korjenic, S., *Equilibrium moisture content of earth bricks biocomposites stabilized with cement and gypsum*, in Cement and Concrete Composites, 59, **2015**, pp. 18-25.

Capitolo 4

Tecnologia domotica per il comfort indoor nel patrimonio costruito

Home automation technology for indoor comfort of existing buildings

The recent developments and technologies in the field of architecture, engineering, and building constructions have led to the rise of the so-called smart buildings. Smart buildings should be sustainable, healthy, technologically aware, flexible, and adaptable, and should fulfill residents' needs, in order to support the shift toward sustainability [1].

The extension of the expected life span requires rethinking and adapting "settlement models", in order to respond to users' needs and fulfill primary needs such as physical and psychic well-being, autonomy, social interaction, safety, and accessibility [2].

Since the first studies on Smart Cities [3], the multi-disciplinarity of the theme of Smart Life and its relationship with the concept of sustainability in terms of human and environmental well-being. The factors behind life quality include daily social participation

(Smart Communities) to economic-productive activities and services.

The Directive (EU) 2018/844 [4] highlights the importance of reducing greenhouse gas emissions: in particular, the European Union is committed to further reducing it by at least 40% by 2030. Since the built environment causes around 36% of CO₂ emissions in the Union, the Directive points out the need to decarbonize the energy supply and reduce consumption. One of the suggested solutions is the improvement of the building system through smart technologies, to manage the need-performance relationship from a sustainable perspective. In the cities that can positively affect building quality, the term "smart" can be attributed to several factors and can be evaluated on the basis of economic, social, cultural, environmental, organizational, and housing parameters. Home automation technologies, together with ICT, transversally involve all these areas and favor their development, easing users' daily life. Energy digitalization represents

an opportunity for energy saving, as it eases energy consumption monitoring, increases the entity of information on the consumption models provided to the consumers, and facilitates more effective network management by the system manager.

Assistive domotics is the science that includes the integration of automation, electronic, computer, and telecommunication technologies in houses, supporting users. The most recent system reorganizations are oriented toward building automation, aiming at the implementation of the domotic system with ICTs, which represent the interfaces of a technologically complex network, and the terminal tool of the communication between the user and the external world. ICTs are significantly being developed in several fields, both in the private sector – houses – and in the public one – offices, hospitals [5], etc. – to guarantee remote services. Among the most recent technologies is Brain Computer Interface (BCI), which translates electroencephalographic signals (EG) into commands to control any type of electronic device.

In building design, ICTs are commonly used together with smart systems that guarantee user comfort and allow users to remotely various devices. These domotic systems consist of products and software (BAC – Building Automation and Control) that allow automatizing one or more activities of the systems integrated into the building. Domotics is also enacted through vocal control commands, which can recognize preset sentences and send device activation signals. ICT-based systems have a significant role in energy efficiency and HVAC systems (heating, ventilation, and air conditioning) [6]. Their study has led to control and monitoring strategies to reduce energy consumption for illumination and air conditioning through cabled and wireless sensor networks [7]. Domotic technologies, together with ICTs, make up a virtual space that intersects and interacts with the physical living space. Concerning the restoration of existing buildings, this soft integration can allow reducing physical modification interventions without renouncing performance update.

4.1 Normativa di riferimento

L'Unione Europea e gli Stati membri hanno, in anni recenti, varato alcune iniziative e messo a disposizione finanziamenti per incentivare e favorire il passaggio verso le "città intelligenti" attraverso interventi che si basano sull'uso delle ICT. A luglio del 2012, la Commissione Europea ha avviato una nuova partnership strategica "Smart Cities and Communities European Innovation Partnership" [9] con l'obiettivo di promuovere soluzioni innovative per la sostenibilità ambientale delle città. I progetti finanziati hanno previsto iniziative che, agevolavano l'uso dei servizi con le ICT, elevando la qualità della vita.

La partnership si è concretizzata con l'istituzione di una piattaforma di stakeholders [10] che raggruppa, ancora oggi, esponenti del mondo dell'industria, della ricerca e amministratori delle città europee. Gli esiti del network sono stati finanziati mediante il programma Horizon 2020 o con fondi strutturali. Il progetto fa parte del Piano strategico per le Tecnologie Energetiche (Set) [11], nel cui ambito l'Unione Europea prevede la creazione di una rete di trenta smart cities come modello prototipale. Tale programma ha visto il coinvolgimento per lo più di città metropolitane, già centri attrattivi dotate di infrastrutture e servizi confortevoli per i cittadini e che nell'insieme garantiscono una buona qualità di vita.

In Italia, da qualche anno, si è instaurato un sistema di comunicazione simile: un portale web a cura dell'Associazione Nazionale Comuni Italiani (ANCI) denominato "Agenda urbana" [12]

e finalizzato a raccogliere in un'unica piattaforma le iniziative di innovazione urbana avviate da Comuni e imprese. A differenza dell'iniziativa europea, non vi è interazione tra stakeholders (esperti, imprese e pubblica amministrazione), ma costituisce un archivio accessibile e utile ai cittadini per conoscere le iniziative riguardo le proprie città e alle amministrazioni e alle imprese come confronto sul lavoro che altre cittadine stanno portando avanti.

Le ICT rappresentano un ambito di ricerca piuttosto diffuso in questi progetti e per il loro sviluppo sono attivi programmi di finanziamento promossi dal Ministero dell'Istruzione e della Ricerca in virtù dell'art. 185 del Trattato sul funzionamento dell'Unione Europea [13]. In particolare, il Programma Active and Assisted Living (AAL) finanzia progetti di ricerca per lo sviluppo di prodotti, sistemi e servizi innovativi che utilizzano tecnologie ICT, finalizzato ad aiutare le persone a essere attive, gioiose e socialmente connesse nella società mentre invecchiano, sia dal punto di vista sociale che personale, contribuendo efficacemente alla loro salute, alla qualità generale della vita e all'inclusione sociale [14]. Active and Assisted Living è la continuazione del programma Ambient Assisted Living, promosso nel 2008 nell'ambito del settimo Programma Quadro. Nelle ultime azioni strategiche è stata programmata l'Agenda Europea per il digitale che mira a fornire un contributo ai paesi europei che sviluppino azioni volte alla crescita ed alla diffusione dei servizi digitali con particolare attenzione a massimizzare il potenziale sociale ed economico delle TIC [15].

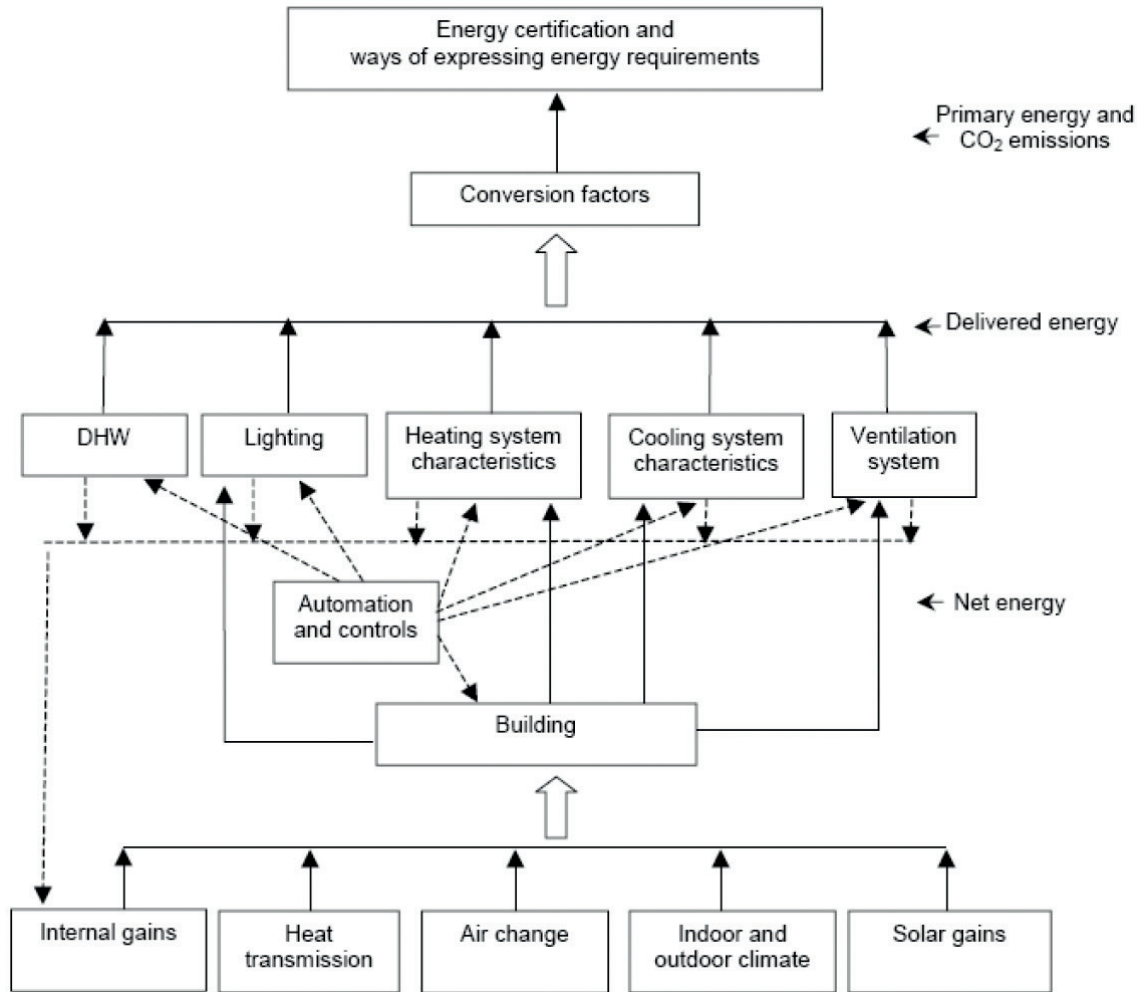
L'accrescimento della tecnologia digitale a supporto del vivere quotidiano è un'azione associata alle strategie di efficienza energetica dell'edilizia esistente. In particolare, la Direttiva (UE) 2018/844 Direttiva sul rendimento energetico degli edifici (EPDB) del Parlamento Europeo e del Consiglio del 30 maggio 2018, introduce, un sistema comune facoltativo per gli Stati membri per determinare la predisposizione degli edifici alla "smartness", cioè la capacità di migliorare l'efficienza energetica e le prestazioni complessive. Questo sistema di valutazione si fonda su un indicatore, lo Smart Readiness Indicator (SRI) [16] e su una metodologia specifica per calcolarlo.

L'"intelligenza" di un edificio si riferisce alla sua capacità di percepire, interpretare, comunicare e rispondere attivamente in modo efficiente alle mutevoli condizioni in relazione al funzionamento dei sistemi tecnici edilizi, l'ambiente esterno (comprese le reti energetiche) e le richieste degli occupanti dell'edificio. L'SRI valuta la prontezza intelligente degli edifici (o delle unità immobiliari) nella loro capacità di svolgere tre funzionalità chiave: ottimizzare l'efficienza energetica e le prestazioni complessive durante l'uso; adattarsi alle esigenze dell'occupante; adeguarsi ai segnali dalla rete con continuità nell'erogazione dei servizi (ad esempio flessibilità energetica). La valutazione dell'indicatore di disponibilità intelligente SRI si riferisce, quindi, prevalentemente alla capacità di un edificio di ospitare servizi smart.

La Commissione Europea ha prodotto un "catalogo di servizi smart-ready" [17] relativo alle costruzioni, che classifica in nove domini

tecnici: riscaldamento, raffreddamento, acqua calda sanitaria, ventilazione, illuminazione, involucro edilizio dinamico, elettricità, ricarica veicoli elettrici, monitoraggio e controllo. Tali servizi smart-ready conseguono da una combinazione di tecnologie e forniscono modalità indipendenti o congiunte di controllo del comfort indoor negli ambienti interni. Per un determinato edificio, tutti i servizi predisposti per lo smart vengono valutati rispetto ai seguenti impatti desiderati degli edifici intelligenti: efficienza energetica, manutenzione e previsione dei guasti, comfort, convenienza, salute, benessere e accessibilità, informazioni agli occupanti, flessibilità e accumulo di energia. Il risultato della valutazione dei singoli servizi smart-ready viene aggregato in un punteggio SRI complessivo, che esprime quanto l'edificio è vicino alla massima disponibilità intelligente. L'indice SRI dovrebbe diventare uno strumento che incoraggi l'adozione di Smart Ready Technologies, attribuendo un valore coerente e tangibile ai benefici forniti dalle tecnologie intelligenti. Gli occupanti degli edifici possono, così, ricevere informazioni sui servizi che l'edificio può fornire e sul potenziale miglioramento, facilitando la manutenzione, l'efficienza impiantistica e allo stesso tempo il benessere dell'utente.

L'aspetto normativo della smartness negli edifici e delle loro prestazioni energetiche è ampiamente richiamato nella norma UNI EN 15232-1:2017 [18], che fa parte della Performance Energetica of Buildings (EPB), insieme di standard inerenti all'automazione e controllo dei sistemi in edifici. Lo standard specifica: - una lista strutturata delle funzioni di control-



Interrelazioni tra flussi di energia in un edificio che potrebbe gestire un sistema BAC. In basso i dati di input, incluse le caratteristiche dell'edificio e i parametri climatici. Fonte: Guida Schneider Electric Efficienza Energetica - impatto dell'automazione sulle prestazioni energetiche degli edifici, www.climotec.it

lo, automazione e gestione tecnica degli edifici che contribuiscono alla prestazione energetica degli stessi. Le funzioni di controllo sono state classificate e strutturate in funzione della regolamentazione per l'edilizia e così denominate Building Automation and

Control Systems (BACS) e Technical Home and Building Management (TBM).

La norma definisce, altresì, i requisiti minimi o ogni altra specifica riguardante tali funzioni e i metodi dettagliati per valutare l'impatto di queste funzioni su un determinato edificio.

Lo standard definisce quattro diverse classi BACS di efficienza energetica da A a D, dalla massima alla minore energia efficiente, per classificare edifici esistenti e nuovi: - Classe D non energeticamente efficiente: comprende gli impianti tecnici tradizionali e privi di automazione e controllo, non efficienti dal punto di vista energetico; - Classe C standard: corrisponde agli impianti dotati di BACS basici, eventualmente dotati di canali di comunicazione a livelli prestazionali minimi; - Classe B avanzato: comprende gli impianti dotati di un sistema BACS avanzato e dotati anche di alcune funzioni di gestione degli impianti tecnici di edificio (TBM) specifiche per una gestione centralizzata e coordinata dei singoli impianti; - Classe A ad alte prestazioni energetiche: corrisponde a sistemi BAC e TBM con livelli di precisione e completezza del controllo automatico tali da garantire elevate prestazioni energetiche all'impianto.

Nell'ultimo caso i dispositivi di controllo degli ambienti interni devono essere in grado di gestire impianti HVAC tenendo conto di diversi fattori (comfort termoigrometrico, sulla qualità dell'aria ecc.) ed includere funzioni aggiuntive integrate per le relazioni tra vari servizi dell'edificio (elettricità, illuminazione, schermatura solare ecc.).

4.2 Tecnologie domotiche integrate nel sistema edilizio

Lo smart building è un edificio dotato di sistemi programmati o comandati per gestire gli elementi impiantistici e tecnologici, al fine di

ottimizzare e migliorare la vita quotidiana dell'utente [19]. Tali sistemi sono propri della domotica, che a scala edilizia, consiste nell'integrazione di tecnologie elettroniche e dell'automazione in alcune componenti impiantistiche dell'abitazione. Un edificio intelligente è in grado di combinare informazioni provenienti da background diversi (ambiente e occupanti) e selezionare la risposta più efficiente per il funzionamento tecnico dei sistemi edilizi. L'intelligenza di un edificio si basa su soluzioni basate sulle TIC, agendo sull'efficienza energetica e sulla flessibilità di gestione dell'energia per la riduzione dell'impatto ambientale dell'edificio stesso e per creare un ambiente sano, confortevole e sicuro per gli occupanti.

Il raggiungimento delle condizioni di comfort interno desiderate è uno degli obiettivi più importanti degli edifici intelligenti. In particolare, il controllo dei parametri ambientali gioca un ruolo cruciale nel fornire qualità ambientale interna, in relazione soprattutto al comfort termoigrometrico [20], alla qualità dell'aria e al comfort visivo. Le tecnologie dell'informazione e della comunicazione (TIC) possono essere una forza trainante significativa per il controllo del microclima interno, fornendo all'utente i valori dei parametri e i dati sul consumo di energia in tempo reale.

Per controllo microclimatico degli ambienti s'intende la possibilità di garantire livelli adeguati di comfort indoor regolando lo scambio termico tra esterno e interno dei parametri di temperatura, umidità relativa e flussi d'aria. Il controllo dell'ambiente microclimatico si può espletare mediante prodotti e software (BAC-Bu-

ilding Automation and Control) che sono in grado di automatizzare una o più attività degli impianti integrati nella struttura edilizia; se progettati costruendo un'infrastruttura tecnologica coordinata tra più circuiti, si parla di BAC System [21].

I BACS ottimizzano le funzioni degli impianti tecnologici mediante la messa a punto di controller e agiscono in maniera attiva sul fabbisogno energetico dell'intero luogo costruito adattando la regolazione del sistema HVAC in funzione delle condizioni climatiche esterne. Sensori inviano lo stato di parametri ambientali (input) ad un sistema informatico di controllo che provvede a intervenire, azionando alcuni dispositivi (output) automaticamente o mediante segnali di comando. I sistemi domotici possono essere progettati andando a costituire un'infrastruttura tecnologica, con più dispositivi e su cui installare interfacce interattive che attivano funzioni utili all'utente e a chi lo assiste. Un'infrastruttura domotica si articola su tre sistemi: l'interfaccia di comando, il mezzo trasmissivo e il protocollo di comunicazione [22].

L'interfaccia di comando è il dispositivo che l'utente utilizza per controllare i dispositivi. Esistono diversi tipi d'interfacce quali, ad esempio, telecomandi a selezione diretta, a scansione, a controllo vocale, sensori a pressione, a soffio ed altri ancora, la cui selezione deve basarsi su un'attenta analisi delle esigenze dell'utente. I computer, così come i palmari, rappresentano validi strumenti d'interfaccia poiché facilmente portabili e capaci di restituire elevate quantità di dati con semplici azioni, previa forma-

zione dell'utente. Le ICT rappresentano le interfacce di un sistema tecnologicamente complesso che associa funzioni di vario tipo e che permettono il controllo dell'edificio da parte dell'utente. Esistono, anche qui, differenti tipi d'interfacce: quali telecomandi a selezione diretta, a scansione, a controllo vocale, sensori a pressione, a soffio ed altri ancora, la cui selezione deve basarsi su un'attenta analisi delle esigenze dell'utente [23]. È solito che le ICT siano progettate insieme a sistemi intelligenti a servizio dell'utente e che coinvolgano più ambiti (energetico, elettrico, sicurezza, ecc.). Grazie al controllo automatico di parametri, è garantito il comfort dell'utente e mediante, per l'appunto, le ICT il controllo in remoto di vari dispositivi [24].

Il mezzo trasmissivo è l'impianto, cablato o wireless, attraverso cui passano i segnali che permettono la comunicazione tra i dispositivi. Il wireless in infrarosso, soluzione largamente adottata poiché soluzione semplice ed economica, non è in grado di superare mezzi fisici interposti. Il wireless a radiofrequenza è in grado di superare ostacoli interposti e rappresentare una buona soluzione laddove non si voglia intervenire con cablaggi aggiuntivi, nel caso ad esempio dell'installazione in un edificio esistente. Alcuni problemi potrebbero invece essere rappresentati da interferenze radio, qualora nelle vicinanze vi siano antenne o ripetitori radio. Le soluzioni cablate più diffuse sono le onde convogliate ed il doppino. Le onde convogliate sfruttano la rete elettrica già esistente per trasmettere segnali di comunicazione tra dispositivi. Questo sistema presenta spesso errori di

funzionamento del sistema a causa di una limitata banda di trasmissione che lo rende molto sensibile a sovraccarichi di tensione provocati da altri dispositivi collegati alla stessa rete elettrica. Il metodo basato su doppino incrociato (Twisted pair) utilizza per la trasmissione un cavo dedicato che deve essere affiancato alla normale rete telefonica [25]. A fronte di un'installazione costosa, la banda di trasmissione può raggiungere valori molto elevati rendendo questo sistema efficiente anche per applicazioni complesse. Il protocollo di comunicazione è il linguaggio con cui i dispositivi comunicano tra loro. Vi sono protocolli di tipo open source e protocolli le cui specifiche sono note solo al produttore del sistema. Il vantaggio di utilizzare protocolli open source rispetto a quelli privati consiste nella possibilità di integrare nella stessa rete produttori differenti che possono modificare e utilizzare i software.

I sistemi più usuali per l'acquisizione delle informazioni sono i sensori che rilevano i valori ambientali di luminosità, temperatura, presenza di gas, umidità, movimento ecc.. Le informazioni sullo stato dell'edificio vengono convogliate al sistema informatico di controllo che provvede a intervenire sui dispositivi qualora i parametri non rispettino i dati preimpostati. A scala edilizia la domotica è finalizzata, per lo più, a massimizzare il risparmio energetico, consentendo significativi abbattimenti dei consumi grazie al controllo automatico dei parametri scelti. Nelle abitazioni la domotica agisce, altresì, in termini di comfort e sicurezza per mezzo di comandi a controllo vocale in grado di riconoscere alcune frasi preimpostate ed

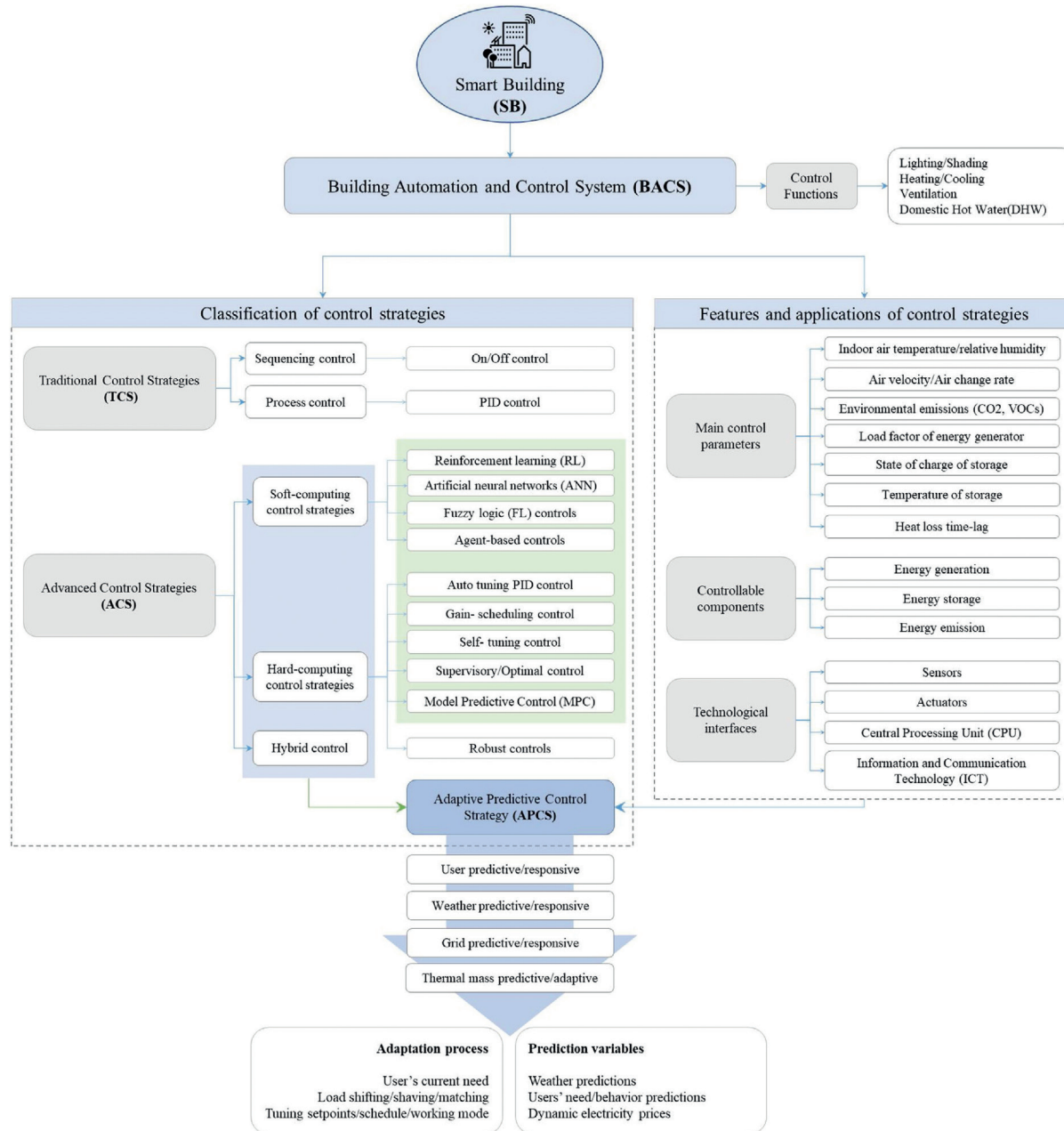
inviare segnali di attivazione dei dispositivi. I dispositivi che ricevono il segnale di attivazione sono svariati e consistono nei componenti terminali degli impianti presenti nell'edificio; quindi possono essere, ad esempio, i radiatori o le pompe di calore, i componenti d'illuminazione, i serramenti, le cassette idrauliche, i nebulizzatori antincendio, le sirene d'allarme, gli elementi di diffusione sonora, i videocitofoni, ecc.. I dispositivi possono entrare in funzione anche attraverso un transponder, ovvero una sorta di "chiave magnetica" di piccole dimensioni che riceve e trasmette il segnale dato dall'utente [26].

Il sistema BAC integra algoritmi che sostituiscono le esigenze dell'utente nel controllo dei sistemi tecnici, sulla base di diversi obiettivi, quali comfort termico e visivo, qualità dell'aria risparmio energetico, minimo costo di esercizio, interazione ottimale con l'ambiente esterno [27].

L'edificio domotico, se richiesto dall'utente, provvede, utilizzando sistemi di ascolto ambientale, a chiamare in sequenza dei numeri di telefono preimpostati, iniziando una conversazione in "viva voce", mediante microfoni e altoparlanti posizionati nei vari ambienti dell'abitazione. Sistemi di questo tipo possono essere integrati con l'utilizzo di telecamere, creando un sistema di videosorveglianza, finalizzato al controllo dell'abitazione. Le tecnologie che regolano le funzioni dell'abitazione possono essere collegate a sistemi di acquisizione di energia rinnovabile le cui accensione e regolazione si possono automatizzare, altresì, con sistemi domotici. L'edificio diviene, così, un ecosistema complesso [28], nel quale ogni impianto è auto-

Caratteristiche, applicazioni e funzioni di BACS negli edifici e nei sistemi HVAC.

Fonte: Gholamzadeh-mir, M., et. al., 2020 [26]



matizzato e lavora con gli altri in modo integrato, rispondendo alle esigenze di benessere dell'utente.

Nel contesto della pratica architettonica, in particolare nelle aree della progettazione sostenibile, strumenti digitali innovativi aiutano alla progettazione integrata di più sistemi impiantistici. Il Building Information Modeling (BIM) può offrire un'opportunità per estendere le TIC e le tecnologie intelligenti nel sistema edilizio [29].

Impianti di ultima generazione hanno ulteriori funzioni con lo scopo di monitoraggio delle attività operative e gestionali dell'edificio mediante data collection, reportistica, contabilizzazione dei consumi, ecc.; in tal caso il sistema si definisce TBM-Technical Building Management. Tale sistema, supervisionando tutti gli impianti tecnici e centralizzando tutte le informazioni su un comune strumento di gestione, protegge l'utente rilevando preventivamente eventuali intrusioni, guasti o anomalie sulle condizioni indoor.

Un sistema BACS può essere associato anche a edifici con tecnologie passive per il riscaldamento, raffrescamento, ventilazione e controllo della radiazione solare. Può, infatti, regolare eventuali sistemi meccanici legati all'apertura e chiusura di punti di ingresso e uscita dell'aria e/o, ad esempio, di sistemi di oscuramento solare, di sistemi free cooling (sistema di raffreddamento degli ambienti che sfrutta l'aria esterna o la temperatura del sottosuolo). Nel caso in cui l'edificio disponga di sistemi di approvvigionamento da fonti di energia rinnovabile può gestire automaticamente i flussi di energia elettrica in funzione del fabbisogno. Gli impianti tecnologici sono regolati in risposta al mutare delle condizioni ambientali esterne, per assicurare sempre il massimo comfort possibile agli occupanti dell'edificio. Segue uno schema sintetico dei principali sistemi di automazione dell'edificio (tabella 1) e delle principali tipologie di gestione e controllo degli edifici (tabella 2).

Tabella 1 Principali sistemi di automazione dell'edificio.

Riscaldamento	Controllo delle emissioni e/o della distribuzione Controllo della temperatura dell'acqua calda della rete di distribuzione Controllo del sistema di distribuzione Controllo del generatore di calore Controllo della carica di accumulo di energia termica
Acqua calda sanitaria	Controllo della carica di accumulo di riscaldamento elettrico diretto o con pompa di calore Controllo dell'accumulo di acqua calda sanitaria Controllo carico di accumulo Controllo della pompa di circolazione dell'acqua calda sanitaria

Raffrescamento	<p>Controllo delle emissioni e/o della distribuzione</p> <p>Controllo della temperatura dell'acqua refrigerata della rete di distribuzione</p> <p>Controllo delle pompe di distribuzione nelle reti idrauliche</p> <p>Controllo del generatore per il raffreddamento</p> <p>Controllo della carica di accumulo di energia termica</p>
Ventilazione	<p>Controllo del flusso d'aria di mandata</p> <p>Controllo della temperatura dell'aria ambiente tramite il sistema di ventilazione (combinazione sistemi di ventilazione e riscaldamento o raffrescamento)</p> <p>Controllo del flusso d'aria esterna</p> <p>Controllo del flusso d'aria o della pressione a livello del convogliatore d'aria</p> <p>Controllo del recupero di calore</p> <p>Controllo dell'umidità</p>
Illuminazione	<p>Controllo dell'occupazione</p> <p>Controllo livello di luce diurna</p> <p>Controllo delle schermature solari</p>
Gestione centralizzata dell'edificio (TMB)	<p>Gestione dei setpoint</p> <p>Gestione del tempo di esecuzione</p> <p>Rilevazione di guasti</p> <p>Segnalazione delle informazioni relative al consumo di energia</p> <p>Misura e analisi delle condizioni ambientali</p> <p>Gestione della produzione locale di energia ed energie rinnovabili</p> <p>Gestione dei sistemi di recupero e scambio di calore</p> <p>Integrazione della rete intelligente o smart grid (sistema di ottimizzazione della distribuzione dell'energia elettrica, decentralizzazione delle centrali di produzione dell'energia, con minimizzazione dei sovraccarichi e variazioni della tensione elettrica)</p>

Fonte: Tabella redatta dall'autrice E. Nicolini sulla base della norma UNI EN 15232-1:2017

Tabella 2 Sistemi di gestione e controllo degli edifici

BAC	Prodotti, software e servizi di ingegneria per controlli automatici, monitoraggio e ottimizzazione degli impianti per ottenere un funzionamento efficiente dal punto di vista energetico, economico e sicuro. Controllo in remoto degli impianti di: riscaldamento, ventilazione e condizionamento, acqua calda sanitaria, illuminazione e delle schermature solari.
BACS	Prodotti, software e servizi di ingegneria in grado di supportare l'efficienza energetica, economica e funzionamento in sicurezza degli impianti tecnici edili attraverso controlli automatici. Facilita la gestione manuale dei sistemi tecnici edilizi e il controllo dell'edificio con sistemi di automazione interconnessi: - controllo centralizzato del sistema di automazione in funzione delle esigenze dell'utente ad es. programmazione a tempo, valori predefiniti; - controllo ottimizzato dei sistemi di automazione: ad es. regolatori auto-adattativi.
TBM	Processi e servizi relativi al funzionamento e gestione degli edifici e del sistema tecnico edilizio attraverso le interrelazioni tra impianti di tipo diverso. Gestione degli impianti tecnici dell'edificio con funzioni per l'efficienza energetica dell'edificio, la manutenzione impiantistica e la sicurezza dell'utente: - rilevamento di anomalie, guasti, diagnostica e supporto alla diagnosi dei guasti; - rapporto riguardante i consumi energetici, le condizioni interne e le possibilità di miglioramento.

TBS	Equipaggiamento tecnico per il riscaldamento degli ambienti, il raffreddamento degli ambienti, ventilazione, acqua calda sanitaria, illuminazione integrata, compresi i sistemi che utilizzano energia da fonti rinnovabili.
STR	Tecnologie pronte intelligenti che possono essere sia tecnologie ICT digitali (es. protocolli di comunicazione o algoritmi di ottimizzazione) o fisiche (es. sistema di ventilazione con sensore di CO ₂ , cablaggio per sistemi di sensori) o loro combinazioni (es. termostati intelligenti). Tali componenti potrebbero potenzialmente: aumentare l'efficienza energetica e il comfort aumentando il livello di controllabilità del TBS da parte dall'occupante o tramite un sistema di controllo completamente automatizzato; facilitare la gestione energetica e la manutenzione dell'edificio anche per mezzo di rilevamento automatico dei guasti; automatizzare la rendicontazione della prestazione energetica; analisi dei dati e sistemi di controllo ad autoapprendimento; abilitare elettrodomestici, sistemi di accumulo e energia da generatori, ecc.
ICT	Dispositivi e software per la trasmissione, ricezione ed elaborazione di dati: - sistemi di monitoraggio mobile e di sensistica (ambientale e personale); - smart speaker e voice assistant. - servizi telefonici e tele monitoraggio; - robotica antropomorfa come caregiver; computer e/o tablet; - portali web, software per la consultazione di dati; - strumenti di teletrasmissione - memorie o cloud computing: CPU o software in rete.

Fonte: Tabella redatta dell'autrice E. Nicolini sulla base della norma UNI EN 15232-1:2017

4.3 Sperimentazioni sulle tecnologie domestiche in ausilio al confort indoor degli edifici esistenti

L'obiettivo della maggior parte degli studi è ridurre al minimo il consumo energetico del sistema di riscaldamento, ventilazione e raffreddamento dell'aria (HVAC), preservando il comfort percepito dagli occupanti dell'edificio [30, 31].

Gli elementi che vengono controllati sono in generale la temperatura interna, l'umidità relativa e il livello di concentrazione dei vari inquinanti (es. CO₂). Il sistema di controllo interagisce con gli impianti HVAC, controllando la temperatura o modificando il tasso di ricambio dell'aria e tutti i restanti elementi al fine di garantire le condizioni di benessere [32].

Uno studio effettuato presso un edificio del campus Universitario Sant Cugat, Università Politecnica della Catalogna, a Barcellona ha dimostrato l'efficiente combinazione tra sistemi passivi e tecnologie domestiche ai fini di un alto livello di qualità interna. Sono stati valutati i consumi energetici e i livelli di comfort interno in un edificio dotato di un sistema di ventilazione naturale. L'edificio è dotato di un prototipo di sistema intelligente con sensori e ICT per assicurare la qualità dell'aria interna e il comfort termico. I risultati supportano l'uso di sistemi di monitoraggio nell'edificio se gli utenti possono controllare i parametri ambientali sia esterni che interni in tempo reale [33]. Lo stesso è confermato da altri studi simili [34].

Un altro studio si basa sulla capacità dei ter-

mostati ambientali di garantire ambienti interni confortevoli. Monitorando i parametri termoisometrici, è stata eseguita una simulazione degli effetti di un sistema BAC per un edificio situato a Creta, con struttura in muratura portante. I risultati indicano che, nella progettazione dei sistemi BAC, trascurare altri parametri che possono influenzare la sensazione termica (quali l'umidità), progettando i regolatori solo sui limiti di temperatura operativa indicati dalla norma ISO 7730:2006 [35] può portare a stime della sensazione termica non valide. L'analisi ha, inoltre, rivelato un apprezzabile disadattamento tra aria interna e temperature operative sia per i test estivi che invernali, dovuto alla dinamica del sistema HVAC e alle proprietà costruttive, concludendo che per edifici con massa termica elevata occorre tenere conto nella strategia di controllo dei guadagni solari e interni dovuti all'inerzia termica del paramento [36]. Da quest'ultimo e altri studi simili [37] ne deriva la necessità di identificare per il sistema BAC profili di set-point ottimali, considerando, oltre le condizioni ambientali prevalenti, le caratteristiche dell'edificio e del suo intorno, anche con modelli dinamici virtuali.

Diversi studi associano ai sistemi di gestione automatica dell'edificio una sensibile riduzione dei consumi energetici fino a circa il 60% dell'energia per il riscaldamento e raffreddamento. Parallelamente al risparmio energetico, è dimostrato che tali sistemi migliorino significativamente il comfort termico interno mantenendo le condizioni interne vicine alla neutralità termica per la maggior parte del tempo occupato [38].

In riferimento al comfort visivo, vari ricercatori mostrano i vantaggi dei sistemi BAC. I sistemi di illuminazione automatizzati, oltre a ridurre i consumi energetici dell'impianto di illuminamento, offrono la possibilità di ottimizzare altri aspetti della luce naturale come salute, benessere, produttività e comfort degli occupanti [39, 40]. La norma UNI EN 15232-1:2017 [18] propone un metodo (c.d. BAC Factors) che fornisce una stima semplificata per valutare il risparmio energetico dovuto all'automazione negli edifici. Alcune ricerche [41] mettono in discussione questo aspetto. Gli autori hanno condotto uno studio sperimentale volto a confrontare i risparmi energetici calcolati utilizzando il metodo del fattore BAC e quelli effettivi all'interno di un laboratorio dell'Università degli studi di Palermo, dimostrando che i risparmi attesi sembrano inferiori a quelli effettivi.

Sono numerose le analisi mirate alla verifica prestazionale degli edifici a quasi zero emissioni serviti da sistemi BAC e tecnologie passive per il comfort indoor. Gli esiti sono per lo più a favore quando tali sistemi presentano una configurazione tale da consentire una risposta in tempo reale alle condizioni ambientali poiché mantengono elevate capacità di adattamento dell'involucro edilizio, sfruttandone al massimo le capacità prestazionali [42, 43].

Si comprende che la tecnologia domotica e l'uso di sistemi automatizzati, abbia delle potenzialità ma la sua complessità richiede un assiduo controllo e adeguamento dei dati input, anche in funzione del rapido cambiamento climatico in atto. Un monitoraggio su alcuni edi-

fici commerciali negli Stati Uniti ha riscontrato un problema di sovraraffreddamento/surriscaldamento che influisce negativamente sugli ambienti termici interni a causa di sistemi BAC configurati in modo errato [44]. Una nuova frontiera dell'interazione uomo-realtà digitale è quella della Brain Computer Interface (BCI), letteralmente interfaccia tra computer e cervello. L'idea è quella di sfruttare i segnali elettroencefalografici (EEG) prodotti dal nostro cervello quando immaginiamo il movimento di una parte del corpo, per inviare segnali in grado di controllare un computer e più in generale ogni tipo di apparecchiatura elettronica [45]. Il riconoscimento di un linguaggio "non verbale" costituito da espressioni facciali, gesti, postura del soggetto, colore del viso ed altro ancora, potrebbe restituire un quadro emotivo che andrebbe a valutare lo stato di salute ed agire in conseguenza per migliorare il comfort e la sicurezza dell'utente.

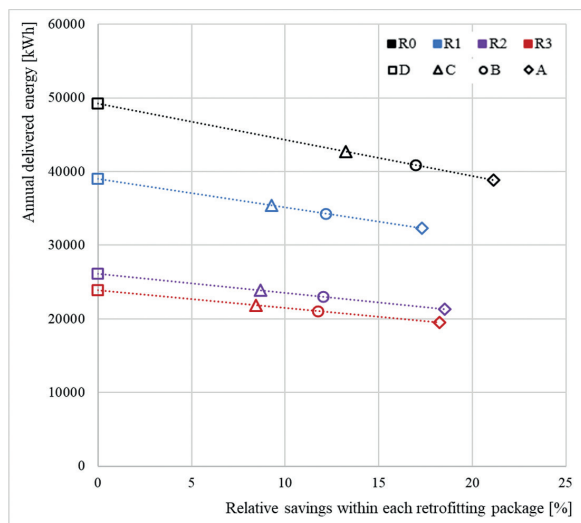
Nel caso di edifici esistenti, applicazioni sul campo mostrano come il rapporto costi-benefici della predisposizione di sistemi BAC o TBM è generalmente positivo rispetto agli edifici nuovi, indipendentemente dal clima, poiché il consumo energetico totale originario dell'edificio è maggiore [46]. Tuttavia, il potenziale di risparmio energetico di BACS è piuttosto basso rispetto ai risparmi che possono essere ottenuti migliorando l'involucro edilizio. Inoltre, potrebbe non essere fattibile in termini di preesistenze e costi di installazione. Pertanto, l'effettiva efficienza del sistema è da valutare caso per caso.

Per una residenza unifamiliare norvegese è

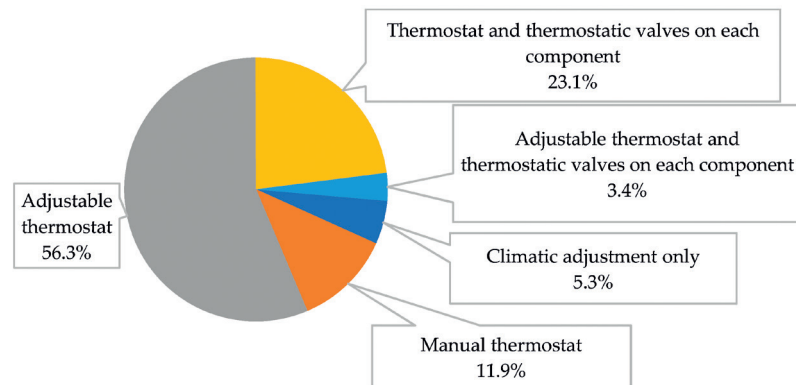
stato valutato l'effetto dell'automazione degli edifici in combinazione con soluzioni di retrofit dell'involucro edilizio. Lo studio ha dimostrato che l'implementazione di sistemi di controllo dell'automazione degli edifici può comportare un risparmio energetico fino al 21% rispetto all'assenza di automazione, indipendentemente dal livello di retrofit. Tuttavia, integrando BACS e migliorando le prestazioni dell'involucro edilizio, è possibile ottenere risparmi energetici fino al 60% [47].

L'interazione umana con il sistema BAC è stata identificata come una lacuna di conoscenze. Sono numerose le occasioni di adeguamento dell'utente a set point programmati che fanno sì che il sistema BAC non funzioni in modo non ottimale. L'utente deve avere un ruolo centrale, affinché il sistema sia effettivamente confortevole, poiché il sistema può essere in grado di calibrarsi alle sue esigenze e abitudini dopo costanti feedback che riceve. I feedback possono, tra l'altro, consentire un maggiore risparmio energetico, calibrando il sistema ad attivarsi solo se necessario per l'utente [48].

Un altro aspetto importante è caratterizzato dalla scelta dei sensori, responsabili della trasmissione dei dati input. I sensori sono elementi cruciali per il processo decisionale dei sistemi di automazione, in quanto segnalano le informazioni utili a definire lo stato di un'attività impiantistica [49, 50]. I sensori a infrarossi passivi (PIR) utilizzano un dispositivo di rilevamento del movimento che segnala l'occupazione in uno spazio indoor. Questi sono spesso implementati per ridurre il consumo energetico dell'illuminazione e dell'HVAC in aree di uso



a



b

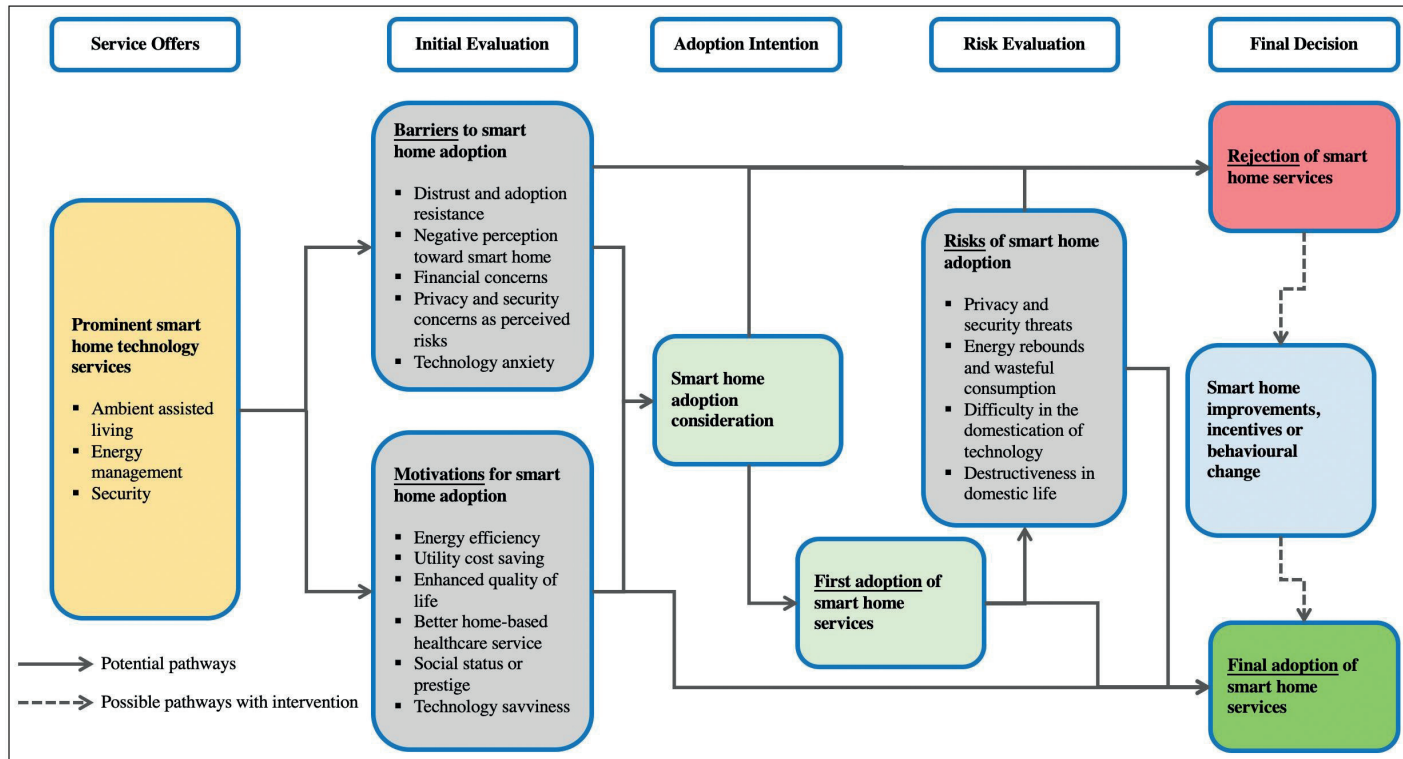
raro e sono stati identificati risparmi del 7,0% per lo spegnimento dei sistemi in assenza di utenti in un determinato ambiente [51, 52].

Lo stato di integrazione dei sistemi BAC negli edifici esistenti è ancora minimo. Un'analisi mostra le abitudini energetiche di un campione di circa cinquecento abitazioni italiane. In dettaglio, in tutte le abitazioni analizzate a campione non sono presenti dispositivi di automazione; esistono soltanto sistemi di controllo per gli impianti di riscaldamento, anche se molto spesso sono costituiti solo da un cronotermostato (56,3%); nel 26,5% dei casi c'è anche una regolazione della temperatura per ogni stanza, dove gli strumenti di programmazione sono disponibili solo nel 3,4% dei casi. Gli impianti di raffrescamento sono presenti solo in 207 abitazioni (49,4%), servendo solo pochi ambienti [53].

Sebbene i potenziali vantaggi derivanti dall'utilizzo di importanti servizi intelligenti rappresentino la forza motrice che spinge gli utenti ad adottarli nella loro quotidianità, alcuni fattori avversi che ne influenzano la disponibilità all'uso degli utenti costituiscono degli ostacoli. Un'analisi, sulla base della revisione sistematica della letteratura, ha sviluppato un quadro concettuale che delinea i passaggi essenziali e le loro interrelazioni, nell'adozione di servizi smart nelle abitazioni [54]. Sono individuati i potenziali rischi che gli utenti potrebbero percepire, derivanti dall'utilizzo quotidiano di tali sistemi, altamente tecnologici.

a. Effetto in percentuale dell'aggiornamento delle misure di automazione degli edifici sull'energia fornita in termini di risparmio energetico per diversi livelli di ristrutturazione. Si noti la diminuzione del consumo di energia (kWh) all'aumentare del sistema BAC.
Fonte: Felius, L.C., et. al., 2020 [47]

b. Quadro concettuale per l'adozione di un ambiente di vita intelligente.
Fonte: Li, W., et. al. 2021 [53]



Quadro concettuale per l'adozione di un ambiente di vita intelligente.

Fonte: Li, W., et. al. 2021

[53]

Bibliografia

1. Arbizzani, E., Civiero, P., Madrigal, L. O., Lanzarote, B. S., *Smart solutions for low-income buildings rehabilitation: international researches and experiences*, in *TECHNE-Journal of Technology for Architecture and Environment*, **2015**, pp. 222-231
2. Bosia D., Montacchini E., Savio L., Tedesco S., Mistrzak J., Daubisse A., *Active Ageing and Urban Interiors: how to live the Spaces of Everyday Life* in Baratta, A. F., Conti, C., Tatano, V., *Abitare inclusivo. Il progetto per una vita autonoma e indipendente Inclusive living*, Anteferma Edizioni, **2019**.
3. Hollands, R. G., *Critical interventions into the corporate smart city*, in *Cambridge journal of regions, economy and society*, 8(1), **2015**, pp. 61-77.
4. Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea, Direttiva 2018/844 del 30 maggio 2018 che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, *Gazzetta ufficiale dell'Unione europea* L 156/75, **2018**.
5. Magarò, A., Baratta, A., Finucci, F., *Intelligent Domestic Ecosystems: Innovative Housing Models for Fragile Elderly*, in *European Journal of Creative Practices in Cities and Landscapes*, Vol. 3, n. 2, **2020**, pp. 69-87.
6. Mamì, A., Nicolini, E., *Riabitare il patrimonio urbano ed edilizio dei territori interni: spazio digitale per servizi sanitari efficienti*. BDC. *Bollettino Del Centro Calza Bini*, 20(2), **2020**, pp. 317-335.
7. Reda, F., Pasini, D., Laitinen, A., Vesanen, T., *ICT intelligent support solutions toward the reduction of heating demand in cold and mild European climate conditions*, in *Energy Efficiency*, 12(6), **2019**, pp. 1443-1471.
8. Aghemo, C., Virgone, J., Fracastoro, G. V., Pellegrino, A., Blaso, L., Savoyat, J., Johannes, K., *Management and monitoring of public buildings through ICT based systems: Control rules for energy saving with lighting and HVAC services*. *Frontiers of Architectural Research*, 2(2), **2013**, pp. 147-161.
9. European Commission, *Communication from the commission smart cities and communities - european innovation partnership*, Brussels, **2012**.
10. European Commission, *Smart Cities Marketplace*, <https://smart-cities-marketplace.ec.europa.eu/>
11. European Commission, *A European strategic energy technology plan (SET-plan) - Towards a low carbon future*, Brussels, **2007**.
12. European Commission, *Agenda urbana per l'UE*, <https://ec.europa.eu/info/eu-regional-and-urban-development/>
13. European Commission, *Consolidated version of the treaty on the functioning of the European Union*, Official Journal of the European Union, n. C 83, Brussels, **2010**.
14. European Commission, AAL Programme, *Ageing Well in the Digital World, Call 2, Social Interaction - ICT based solutions for advancement of social interaction of elderly people*, <http://www.aal-europe.eu/>

15. European Commission, *A Digital Agenda for Europe*, COM(2010) 245, p.3, Brussels, **2010**.
16. European Commission, *Smart Readiness Indicator for Buildings*, <https://smartreadinessindicator.eu/index.html>
17. Verbeke, S., Ma, Y., Van Tichelen, P., Bogart, S., Gómez Oñate, V., Waide, P., Schulte, J. *Support for setting up a Smart Readiness Indicator for buildings and related impact assessment: final report for EC DG Energy*, VITO, **2018**.
18. Ente Italiano di Normazione, *EN 15232-1:2017 Energy Performance of Buildings - Energy performance of buildings - Part 1: Impact of Building Automation, Controls and Building Management - Modules M10-4,5,6,7,8,9,10*, **2017**.
19. Buckman, A.H., Mayfield, M., B.M. Beck, S., *What is a Smart Building?*, in *Smart and Sustainable Built Environment*, Vol. 3 No. 2, **2014**, pp. 92-109.
20. Ren, C., Cao, S. J., *Development and application of linear ventilation and temperature models for indoor environmental prediction and HVAC systems control*, in *Sustainable Cities and Society*, 51, **2019**.
21. Schönenberger, P., *Eu. bac System*, in *Energy and Buildings* n. 100, **2015**, pp. 16-19.
22. Capolla, M., *La casa energetica. Indicazioni e idee per progettare la casa a consumo zero*, Maggioli Editore, **2011**.
23. Quaranta, G. G., *La domotica per l'efficienza energetica delle abitazioni*, Maggioli Editore, **2013**.
24. Stefanov, D. H., Bien, Z., Bang, W. C., *The smart house for older persons and persons with physical disabilities: structure, technology arrangements, and perspectives*, in *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, 12(2), **2004**, pp. 228-250.
25. Ricci, L., *Sistemi di domotica applicata per una casa intelligente: Nuove tendenze nel settore della home automation*. Dario Flaccovio Editore, **2015**.
26. Romanello, F., Pizzuti, S., Romano, S., Snels, C., Luccarini, L., Zanela, A., Maestosi, P. C., *Implementazione di applicazioni dedicate per Smart Home e Assisted Living*, Accordo di Programma MISE-ENEA, **2017**.
27. Gholamzadehmir, M., Del Pero, C., Buffa, S., Fedrizzi, R., *Adaptive-predictive control strategy for HVAC systems in smart buildings—A review*, in *Sustainable Cities and Society*, 63, **2020**.
28. Davidoff, S., Lee, M.K., Zimmerman, J., Dey, A.K., *Socially aware requirements for a smart home*, in *Proceedings of the International Symposium on Intelligent Environments*, **2006**, pp. 41-44.
29. Wehbe, R., Shahrour, I., *Use of BIM and smart monitoring for buildings' indoor comfort control*, in *MATEC web of conferences* Vol. 295, EDP Sciences., **2019**.
30. Marinakis, V., Doukas, H., Karakosta, C., Psarras, J., *An integrated system for buildings' energy-efficient automation: Application in the tertiary sector*, in *Applied energy*, 101, **2013**, pp. 6-14.
31. Bellia, L., Borrelli, M., De Masi, R. F., Ruggiero, S., Vanoli, G. P., *University building: Energy diagnosis and refurbishment design*

- with cost-optimal approach. Discussion about the effect of numerical modelling assumptions*, in *Journal of Building Engineering*, 18, 2018, pp. 1-18.
32. Osello, A., Acquaviva, A., Aghemo, C., Blaso, L., Dalmasso, D., Erba, D., Virgone, J., *Energy saving in existing buildings by an intelligent use of interoperable ICTs*, in *Energy efficiency*, 6(4), 2013, pp. 707-723.
 33. Habibi, S., *Smart innovation systems for indoor environmental quality (IEQ)*, in *Journal of building engineering*, 8, 2016, pp. 1-13.
 34. Di Giulio, R., Boeri, A., Longo, D., Gianfrate, V., Boulanger, S. O., & Mariotti, C., *ICTs for accessing, understanding and safeguarding cultural heritage: the experience of INCEPTION and ROCK H2020 projects*, in *International Journal of Architectural Heritage*, 15(6), 2021, pp. 825-843.
 35. International Organization for Standardization, *UNI EN ISO 7730:2006 Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale*, 2006
 36. Kontes, G. D., Giannakis, G. I., Horn, P., Steiger, S., Rovas, D. V., *Using thermostats for indoor climate control in office buildings: the effect on thermal comfort*, in *Energies*, 10(9), 2017.
 37. Verbeke, S., Audenaert, A., *Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use*, in *Renewable and sustainable energy reviews*, 82, 2018, pp. 2300-2318.
 38. Yang, S., Wan, M. P., Chen, W., Ng, B. F., Zhai, D., *An adaptive robust model predictive control for indoor climate optimization and uncertainties handling in buildings*, in *Building and Environment*, 163, 2019.
 39. Galatioto, A., Beccali, M., *Aspects and issues of daylighting assessment: A review study*, in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 2016, pp. 852-860.
 40. Kruisselbrink, T. W., Dangol, R., Van Loenen, E. J., *A comparative study between two algorithms for luminance-based lighting control*, in *Energy and Buildings*, 228, 2020.
 41. Bonomolo, M., Zizzo, G., Ferrari, S., Beccali, M., Guarino, S., *Empirical BAC factors method application to two real case studies in South Italy*, in *Energy*, 236, 2021.
 42. Loonen, R. C., Trčka, M., Cóstola, D., Hensen, J. L., *Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges*, in *Renewable and sustainable energy reviews*, 25, 2013, pp. 483-493.
 43. Upadhyay, K., Ansari, A. A., *Intelligent and Adaptive Facade System—The Impact on the Performance and Energy Efficiency of Buildings*, in *J. Civil Eng. Environ. Technol*, 4, 2017, pp. 295-300.
 44. Derrible, S., Reeder, M., *The cost of over-cooling commercial buildings in the United States*, in *Energy and Buildings*, 108, 2015, pp. 304-306.
 45. Leuthardt, E. C., Schalk, G., Wolpaw, J. R., Ojemann, J. G., Moran, D. W., *A brain-computer interface using electrocorticographic signals in humans*, in *Journal of neural engineering*, 1(2), 2004, p. 63.

46. Ippolito, M., Sanseverino, E. R., Zizzo, G., *Impact of building automation control systems and technical building management systems on the energy performance class of residential buildings: an Italian case study*, in Energy and Buildings, 69, 2014, pp. 33–40.
47. Felius, L. C., Hamdy, M., Hrynyszyn, B. D., Dessen, F., *The impact of building automation control systems as retrofitting measures on the energy efficiency of a typical Norwegian single-family house*, in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, In press. IOP Publishing, 2020.
48. Ahmadi-Karvigh, S., Ghahramani, A., Becerik-Gerber, B., Soibelman, L., *One size does not fit all: Understanding user preferences for building automation systems*, in Energy and Buildings, 145, 2017, pp. 163-173.
49. Soltanaghaei, E., Whitehouse, K., *Practical occupancy detection for programmable and smart thermostats*, in Applied Energy 220, 2018, pp. 842-855.
50. Arbizzani, E. and Mangiatordi, A., *Progetto smart per le residenze per anziani: caratteri tipologici e soluzioni tecnologiche*, in Baratta, A.F.L. et al. (Ed.), Abitazioni Sicure e Inclusive per Anziani, Anteferma Edizioni, Conegliano, 2018, pp. 41-50.
51. Gomes, L., Ramos, C., Jozi, A., Serra, B., Paiva, L., Vale, Z., *IoH: a platform for the intelligence of home with a context awareness and ambient intelligence approach*, in Future Internet, 11(3), 2019, p. 58.
52. Lin, G., Yang, Y., Pan, F., Zhang, S., Wang, F., & Fan, S., *An optimal energy-saving strategy for home energy management systems with bounded customer rationality*, in Future Internet, 11(4), 2019, p. 88.
53. Mancini, F., Lo Basso, G., De Santoli, L., *Energy use in residential buildings: Impact of building automation control systems on energy performance and flexibility*, in Energies, 12(15), 2019.
54. Li, W., Yigitcanlar, T., Erol, I., Liu, A., *Motivations, barriers and risks of smart home adoption: From systematic literature review to conceptual framework*, in Energy Research & Social Science, 80, 2021.

Parte IV

Il comfort indoor nel patrimonio costruito.

Casi studio

Part IV – Indoor comfort in the built environment. Legislative aspects and assessment processes

In the past sections, this volume has focused on Indoor Environmental Quality in the built environment, starting from the analysis of the state of the art in legislative, procedural, and technological aspects for the obtainment of salubrious and comfortable indoor spaces. The previous sections of this volume have shown that the redesign of the built environment can be based on real users' needs while keeping at the same time high levels of architectural quality and environmental sustainability; moreover, it has been shown that this issue is at the center of several international debates. This fourth and last part, in continuity with the previous ones, shows practical experiences and consists of four case studies with a focus on the performance of the technological components of the building envelope and on the level of well-being

required to guarantee suitable livability in confined spaces. These significant examples and methodological models can support the definition of repeatable solutions, to be adapted in similar contexts. Three of the four case studies concern improvement actions for thermo-hygrometric comfort and indoor air quality in the built environment: the first case study evaluates the effects of a ventilation passive system in a musealized archaeological space (Alberghina M. F., Nicolini E., Prestileo F. Schiavone S., *Effects of the new roofing system on the microclimate of Villa del Casale in Piazza Armerina (Sicily) for the improvement of the conservation state and visitors' comfort*; research carried out in a collaboration between the Department of Architecture of the University of Palermo (DARCH), the Institute of Atmospheric Sciences and Climate of the National Research Council in Rome (CNR-ISAC), and the Diagnostic Society for the Cultural Heritage S.T.Art-Test sas in Caltanissetta); the second one is the verification of the thermal insulation performance in

a ventilated green wall (Nicolini, E., *Verification of the thermal performance of a ventilated green wall under extreme sunny, windy, and rainy weather*, research carried out in a collaboration between the Department of Architecture (DARCH) and the Department of Economics, Business, and Statistics (DSEAS) of the University of Palermo, and the Department of Construction and Architectural Technology (DCTA) of the Polytechnic University of Madrid); the third is the reintroduction of an ancient technique, the use of opus signinum to improve the thermal response of existing masonry structure (Rosso M., Agostinelli S., *Opus signinum for microclimatic improvement in residential buildings: monitoring of the case study in the Po valley*, research carried out by the Department of Planning, Design, and Technology of Architecture, Sapienza University of Rome). The fourth case illustrates the method used for annual microclimatic monitoring, highlighting

the influence of external climatic conditions on the indoor environment (Pelosi C., Lanteri L., Blanco B., *Microclimatic monitoring of the Civic Museum of Narni, in Terni province: fruition needs and conservation aspects of panel paintings*, research carried out in a collaboration between the Department of Economics, Engineering, Society and Business of the University of Tuscia and Viterbo and the company Archeoares – Services for cultural heritage and tourism, Terni). All the case studies deal with the above-described themes of salubrity and comfort in indoor environments, in relation to the user-environment interaction. Moreover, since the involved technological solutions do not require active energy consumption, they have an implicit sustainable value for the environment and the building management economy as well.

Effetti del nuovo sistema di copertura sul microclima della Villa del Casale di Piazza Armerina (Sicilia) per migliorare le condizioni di conservazione e il comfort dei visitatori

Maria Francesca Alberghina¹, Elvira Nicolini², Fernanda Prestileo³, Salvatore Schiavone¹

1. Esperto scientifico per i beni culturali presso S.T.Art-Test sas, Niscemi (CL), Italia

2. Ricercatrice presso il Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Palermo, Italia

3. Esperto scientifico per i beni culturali presso l'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima (CNR-ISAC), Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, Italia

The musealization process of a cultural site requires a double focus: the conservation of the constituting materials and the well-being of the users. The influence of environmental parameters on material decay is a well-known item: chemical, physical, and biological processes contribute to reducing the expected life of the archaeological or artistic artifacts. Furthermore, the conditions of thermohygrometric comfort are necessary to guarantee the correct use of the site. The paper focuses on the thermohygrometric conditions and indoor comfort for visitors in the archaeological site of Villa Romana del Casale, in Piazza Armerina, Sicily, which is a UNESCO site since 1997. A complex restoration project was performed on this site from 2007 to 2012, aimed at improving the conservation of the mosaic floors, mural paintings and users' well-being, through the new design and consequent replacement of the shelter system. The microclimate monitoring, aimed to

verify the environmental conditions created by the new shelters, has been focused on sample room, on which the new covering system has been completed, and rooms that still are covered by the methacrylate old system. The comparison between the environmental parameters related to the old covering system, which caused undesired effects both for fruition and conservation of archaeological findings (mosaics, mural painting, mortars and stone), and the data related to the new covering system, allowed verifying the improvement in microclimatic conditions after the intervention. Data have demonstrated that the new one has reduced temperature inside the rooms and has increased humidity values. These analytical data highlighted that the conservative intervention provided a positive impact on microclimatic conditions. Indeed, the comparison also showed the absence of the dangerous greenhouse effect.

1. Introduzione

I siti archeologici musealizzati sono sensibili a determinati fattori ambientali, tra tutti i fondamentali sono: temperatura, umidità relativa, luce e agenti chimici e biologici. Questi fattori e il loro equilibrio sono determinanti per garantire il mantenimento e la tutela del sito culturale e del suo apparato decorativo e dei reperti archeologici. In particolare, le variazioni periodiche della temperatura dell'aria e dell'umidità relativa possono causare cicli secchi e umidi e movimenti dell'aria che sono solitamente responsabili dei processi di degrado e formazione dei depositi di sporco [1, 2, 3]. I siti archeologici dotati di coperture costituiscono casi particolari dal punto di vista delle problematiche di conservazione. La progettazione di una copertura di un sito archeologico richiede un duplice focus: da un lato, la conservazione dei reperti; dall'altro il benessere dei visitatori. In risposta ad entrambe le esigenze, l'ambiente microclimatico deve essere progettato e monitorato nel tempo. I parametri ambientali influiscono sui processi di deterioramento dei materiali; inoltre, pur essendo prioritario garantire le condizioni microclimatiche per la tutela del patrimonio culturale, il comfort termoigrometrico è necessario per garantire la corretta fruizione da parte dei visitatori e la permanenza del personale del sito archeologico.

La questione più rilevante nel campo del monitoraggio dei siti culturali è la definizione di condizioni microclimatiche più appropriate e stabili che dovrebbero essere garantite negli ambienti dedicati alla conservazione dei manu-

fatti. Per prolungare la vita dei manufatti e raggiungere un'elevata qualità climatica, tutte le linee guida raccomandano condizioni di temperatura e umidità relativa stabili entro un determinato intervallo. Nel campo dei beni culturali, le linee guida sono ampiamente utilizzate per raccomandazioni generali sulla conservazione, la costruzione di nuovi musei o la musealizzazione di edifici antichi o siti archeologici [4, 5, 6].

Tuttavia, spesso si osservano ancora elevate escursioni di temperatura e umidità relativa giornaliera, mensile o stagionale. Pertanto, l'analisi dei picchi e degli abbassamenti dei valori di temperatura e umidità aiuta a riconoscere se sono presenti eventuali rischi legati all'escursione repentina dei valori termoigrometrici. Questa analisi potrebbe fornire informazioni sul tipo di azioni di mitigazione richieste, intervenendo tramite azioni migliorative [3].

Per acquisire le conoscenze sullo stato di conservazione di un edificio storico, sull'attuale degrado dei materiali e sui principali comportamenti del microclima nel tempo è indispensabile effettuare una campagna di monitoraggio. La conoscenza del comportamento del microclima all'interno dei siti culturali e l'identificazione e definizione dei processi di degrado che interessano strutture e materiali sono i presupposti per la definizione di un corretto piano di intervento, per preservare tale patrimonio [7, 8, 9]. Il monitoraggio microclimatico indoor rappresenta la possibilità di garantire adeguati livelli di comfort, regolando lo scambio termico tra esterno ed interno attraverso sistemi attivi o passivi, eventualmente

combinati fra loro. Nel primo caso, il raggiungimento dell'obiettivo di comfort è il presupposto alle caratteristiche tecnologiche e termofisiche dell'involucro edilizio: a seconda del contesto, possono favorire o bloccare il passaggio dei flussi d'aria, energia termica e vapore acqueo provenienti dall'esterno all'ambiente interno. Il microclima interno dipende dai componenti e dai sistemi dell'edificio che separano l'ambiente interno dall'ambiente esterno. L'involucro deve garantire un'elevata inerzia termica, per proteggere gli ambienti interni dal caldo e dal freddo, e assicurare il comfort termoigrometrico, così da prevenire fenomeni di condensazione superficiale e interstiziale. Per quanto riguarda il controllo del microclima con sistemi attivi, le attuali tecnologie consentono la gestione automatica dei parametri e prevedono la possibilità di controllare a distanza il sistema impiantistico [10].

Il presente caso studio si concentra sull'identificazione delle condizioni termoigrometriche ottimali per i visitatori del sito archeologico della Villa Romana del Casale, a Piazza Armerina (Sicilia) e per il sito stesso. I dati del monitoraggio acquisiti sono strumenti preziosi per valutare possibili soluzioni di efficienza energetica, volte a migliorare il comfort dell'utente e a ottenere condizioni microclimatiche ottimali per la conservazione dei manufatti all'interno del sito culturale. Il progressivo deterioramento del sistema di copertura, ha fatto sì che il Centro Regionale per la Progettazione e il Restauro (C.R.P.R.), Assessorato dei Beni Culturali ed Ambientali e della Pubblica Istruzione della Regione Siciliana avviasse un'arti-

colata attività di studio e ricerca sugli aspetti conservativi caratterizzanti il sito archeologico e il suo apparato decorativo. Dopo una prima fase progettuale interrotta nel 2004, nel 2005 viene presentato dal C.R.P.R., sotto la direzione dell'architetto Guido Meli, allora direttore del C.R.P.R., il "Progetto per il recupero e la conservazione della Villa Romana del Casale di Piazza Armerina" e secondo le linee guida dettate dal neominato Alto Commissario per la Villa del Casale, Vittorio Sgarbi, i cui lavori sono finalmente iniziati nel 2007 per opera del Consorzio O.B.C. di Firenze [9, 10, 11].

Il complesso progetto di recupero, concluso dopo cinque anni con l'inaugurazione, il 4 luglio 2012, della nuova musealizzazione del sito (in questo lungo periodo l'area archeologica non è mai stata chiusa al pubblico), ha riguardato oltre al restauro di oltre 3.500 mq di pavimenti a mosaico e *opus sectile* anche il restauro delle pitture murali che decorano circa il 50% delle pareti delle stanze della Villa. L'intervento ha previsto la sostituzione delle obsolete pensiline, la progettazione di nuove passerelle sospese, meno invasive per il percorso di visita, nonché un nuovo impianto di illuminazione, previsto anche per le aperture serali del sito, e il riassetto, dal punto di vista idrogeologico e naturalistico, dell'area su cui sorge l'intero sito archeologico.

2. L'intervento di recupero e i nuovi materiali per il sistema di copertura

La soluzione formale dell'intervento rimanda

all'immagine volumetrica originaria del sito antico, se pur attraverso un processo di astrazione e di semplificazione. Il progetto ha inteso fornire ai visitatori l'opportunità di percepire i rapporti spaziali tra i diversi ambienti, suggerendo volumetrie consone alla tipologia costruttiva della Villa imperiale. Lo stato di fatto, in cui si presentava la Villa prima dell'intervento, tradiva molte delle intenzioni di progetto ideate dall'arch. Minissi quarant'anni prima: nel tempo varie manomissioni hanno alterato la lettura complessiva del sito e delle trasparenti coperture in perspex con struttura in acciaio; molte parti della copertura sono state sostituite, il controsoffitto rimosso e le originarie veneziane smontate (Fig. 1a, 1b). Nel nuovo intervento, con la sostituzione integrale delle coperture, si è scelta una soluzione con materiali opachi e l'impiego del legno lamellare per il pacchetto di copertura e come rivestimento delle capriate e dell'acciaio per l'intera struttura portante: montanti e anima delle capriate. Si sono ridimensionate le escursioni termiche, volendo garantire elevate prestazioni di coibenza, aerazione e permeabilità. A tal fine, si è previsto, l'uso di una copertura coibentata in fibra vegetale, dotata di una camera di ventilazione e rivestita all'esterno da un tegumento sagomato in lamina di rame pre-ossidata, di colore verde con effetto cangiante (Fig. 1c). Per contribuire all'ottimizzazione microclimatica delle stanze della Villa si è prevista sul colmo un'apertura a camino con sagomatura a libro per richiamare la configurazione del coppo di colmo (C.R.P.R., 2007). I camini di ventilazione presentano dimensioni variabili in funzione del

volume dei singoli ambienti. Il legno è stato trattato per evitare l'insorgenza di degrado biologico e per assicurare la richiesta protezione dal fuoco; l'acciaio zincato a caldo è stato sabbiato e preossidato al fine di conferire un'elevata durabilità nel tempo ed esteticamente un effetto tipo Corten che ben si integra nel contesto inserito [9].

Nella progettazione della nuova struttura è prevalso il criterio di rispettare le intuizioni strutturali e la scelta tecnologica di Minissi, confermando la volontà di una struttura "autonoma" e reversibile che non interferisce con le murature storiche [9]. La filtrazione della luce solare, operata dalla copertura in perspex provocava però un'alterazione dei rapporti tra le differenti componenti cromatiche della luce entrante, conferendo ai mosaici un aspetto opaco, privo di contrasti e che svelava l'effetto negativo prodotto dai sali cristallizzati in superficie. Le problematiche di natura termica, l'instabilità dimensionale e ottica sorta nel tempo, l'alta dilatazione termica, l'impossibilità di utilizzare strati basso emissivi, hanno riconosciuto l'uso del perspex come una scelta impropria in situazioni come questa, caratterizzate da alto irraggiamento solare.

L'utilizzo di una copertura opaca, opportunamente coibentata, vuole invece superare i problemi fisico-tecnici e strutturali, permettendo di ridurre lo squilibrio dei parametri termogrometrici interni e migliorare l'aspetto visivo dell'ambiente.

Si sono adottate delle chiusure verticali opache, coibenti e riflettenti l'irraggiamento, poste lungo il perimetro esterno del comples-

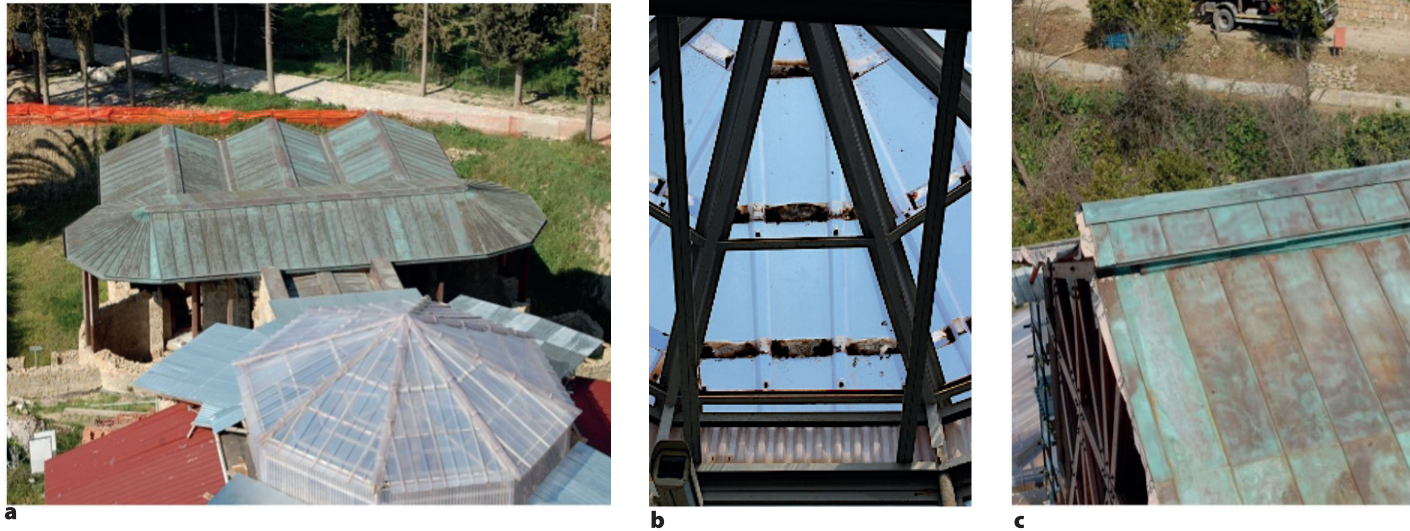


Fig. 1 Villa del Casale (Piazza Armerina, EN): a) parte del sito coperto con la nuova struttura e parte con quella precedente. Sono visibili anche parti rivestite di lamiera; b) dettaglio delle vecchie coperture in metacrilato con depositi biologici accumulati negli interstizi dei pannelli di copertura; c) dettaglio del camino di ventilazione del nuovo tetto (Foto scattate durante la fase di costruzione da Elvira Nicolini).

so monumentale. Tali chiusure sono realizzate con pannelli in cartongesso ancorati alla struttura di sostegno delle coperture e staccate dalla muratura al fine da creare un flusso di ventilazione naturale entrante da tale punto e uscente dal camino sulla copertura. Il tema imposto è quello del benessere termoigrometrico al livello delle passerelle di visita e la più possibile stasi dei moti convettivi a livello dei pavimenti; ciò per non accelerare la migrazione salina, costante dal sottosuolo verso le tesse musive.

3. Metodologia di indagine e obiettivi del monitoraggio microclimatico

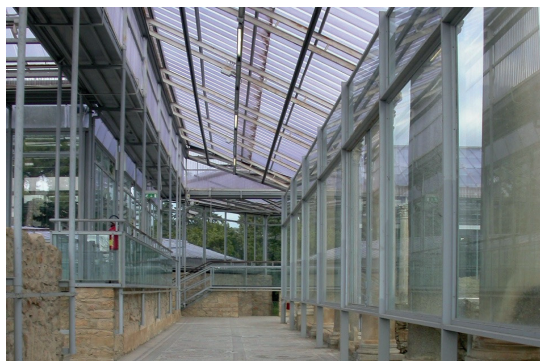
Il controllo del microclima gioca un ruolo cruciale nella corretta conservazione dei manufat-

ti in ambienti confinati e semiconfinati. Per questo motivo è necessario effettuare il monitoraggio del microclima di un sito museale ancor prima di ogni altra azione prevista. Ciò è necessario per caratterizzare dal punto di vista fisico gli ambienti espositivi e per evidenziare l'influenza dei parametri ambientali sullo stato di conservazione del sito, delle superfici di pregio presenti, e dei manufatti in genere. Il monitoraggio è fondamentale anche per valutare gli effetti del microclima sulla fruizione dei visitatori in relazione al loro benessere durante la visita [3, 12]. La conoscenza delle condizioni ambientali, finalizzata a comprenderne gli effetti sulla conservazione e sulla fruizione, è ancor più cruciale per il patrimonio archeologico, in quanto spesso si trova in siti semiconfinati o esterni, e quindi più difficili da controllare e gestire.



a

La Villa del Casale di Piazza Armerina rappresenta un caso esemplare di difficile gestione e conservazione preventiva per gli effetti generati dalle coperture archeologiche. Il sistema di copertura dell'Arch. Minissi, infatti, ha creato un ambiente sia termicamente che dal punto di vista dell'illuminazione non idoneo alla conservazione e alla fruizione del sito. Come precedentemente detto, la scelta progettuale iniziale è stata modificata a causa del degrado dei materiali e delle modifiche apportate al progetto originario nel corso dei decenni. Molte delle strutture verticali sono state sostituite, compreso il recinto verso il *Peristilium*, determinando una riduzione della ventilazione all'interno degli ambienti (Fig. 2). Di conseguenza, ciò ha determinato il generarsi dell'effetto serra, ulteriormente accresciuto dalla luce solare diretta sui mosaici, dovuta alle coperture trasparenti, e la proiezione di ombre dalle strutture metalliche di supporto. Già nel 2003/2004 era stata condotta una prima campagna di monitoraggio microclimatico da parte del C.R.P.R. Regione Siciliana in sei ambienti della Villa, appositamente



b

scelti per le loro caratteristiche strutturali e per la rilevanza degli apparati decorati presenti [14, 15, 16]. Questa campagna annuale di monitoraggio è stata effettuata, dopo la rimozione dei controsoffitti, allo scopo di avviare un'indagine conoscitiva delle condizioni microclimatiche all'interno dei diversi ambienti della Villa, propedeutica al progetto di restauro e alla successiva musealizzazione del sito archeologico secondo le nuove esigenze [9].

Alla fine del 2011 una seconda campagna di monitoraggio termoigrometrico è stata condotta dalla S.T.Art-Test sas in collaborazione con il Parco Archeologico della Villa del Casale durante i lavori di restauro. Inoltre, la scelta del posizionamento delle sonde è stata effettuata, ove possibile, in funzione delle condizioni del sito, e tenendo conto del precedente monitoraggio del 2003/2004, in modo da ottenere dati quanto più possibile confrontabili (Fig. 3).

La seconda campagna di indagine microclimatica è stata effettuata tra settembre 2011 e settembre 2012 ed è stata finalizzata al rilievo e all'analisi delle condizioni ambientali generate

Fig. 2 Villa del Casale (Piazza Armerina): a) dettaglio delle precedenti coperture in metacrilato; b) particolare del Peristilium chiuso con gli elementi verticali (©C.R.P.R, Regione Siciliana, Palermo).

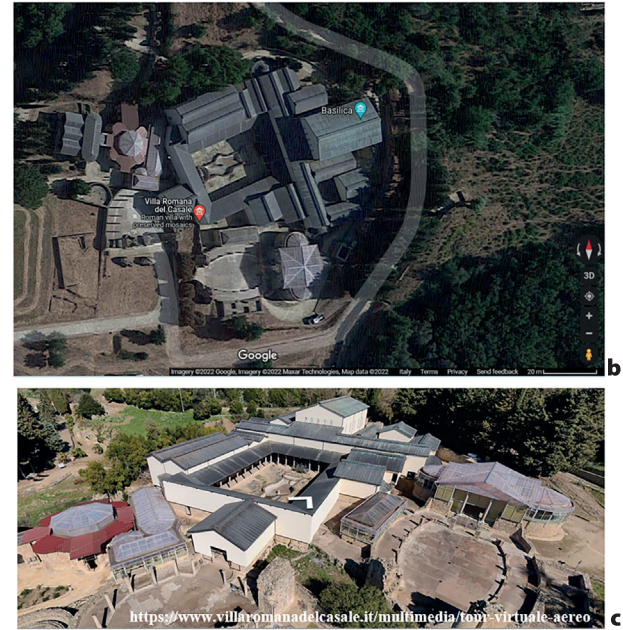
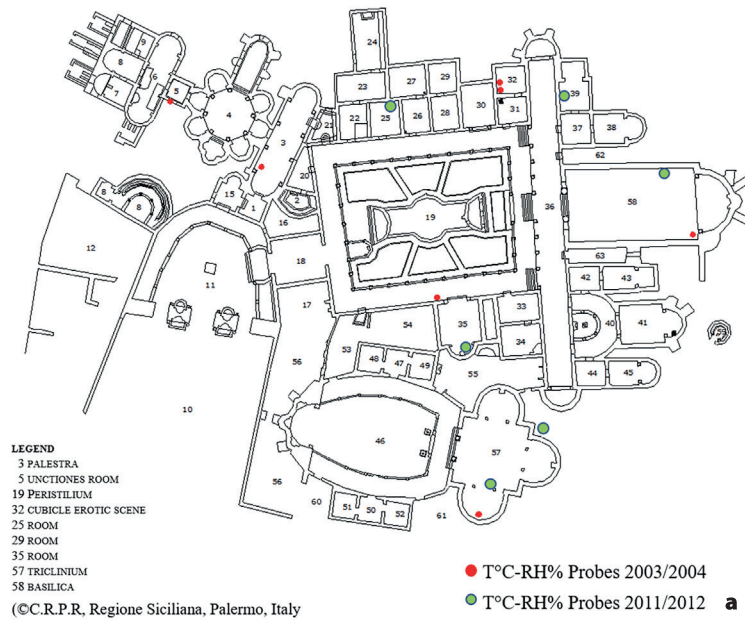


Fig. 3. **a)** Mappa della Villa del Casale con localizzazione delle sonde: (cerchi rossi) monitoraggio microclimatico 2003 (fonte: Prestileo 2005); (cerchi verdi) monitoraggio del microclima 2011 (fonte: Alberghina et al., 2012); **b)** planimetria del sito, immagini dall'alto (fonte: Google Earth); **c)** render prospettico del sito archeologico disponibile sul sito ufficiale della Villa del Casale (fonte: <https://www.villaromanadelcasale.it/multimedia/tour-virtuale-aereo>).

dal nuovo sistema di copertura della Villa [17]. Il monitoraggio è stato effettuato su alcuni ambienti campione, quali la Basilica e gli Appartamenti Nord e ambienti che conservano ancora il vecchio sistema di copertura in metacrilato, tra cui il *Triclinium*, progettato dall'Arch. Minissi negli anni '60 del secolo scorso e più volte modificato nei decenni successivi. Nel presente lavoro si riportano, a titolo esemplificativo, i dati termoigrometrici registrati tra il 2011 e il 2012 all'interno di due ambienti, la Basilica e la Stanza 35: nella prima era già stata ultimata la nuova copertura, mentre nella seconda è stata sostituita nell'aprile 2012. Tali dati sono stati confrontati con i dati relativi alle condizioni

ambientali esterne registrate nello stesso periodo di riferimento e alle condizioni interne degli ambienti ancora interessati dal rivestimento in metacrilato. Questi erano caratterizzati da condizioni termoigrometriche estreme sia in inverno (valori di temperatura molto bassi e di umidità relativa elevati) che in estate (valori di temperatura molto elevati e di umidità relativa molto bassi).

Entrambe le campagne di misura del 2003/2004 e 2011/2012 – come si è detto, la prima precedente ai lavori di restauro del sito archeologico e la seconda in due fasi: durante l'intervento e al suo completamento per verificarne le nuove condizioni - sono state finalizzate a:

- rilevare la situazione dei parametri termoisigrometrici, temperatura (T°C) e umidità relativa (UR%), negli ambienti della Villa opportunamente scelti;
- elaborare i dati raccolti per esaminare gli andamenti orari, giornalieri e annuali e la loro influenza sul benessere di fruizione dei visitatori e sullo stato di conservazione dei mosaici (tessere lapidee e vitree) e delle pitture murali;
- confrontare i valori ottenuti con i limiti microclimatici specifici per le diverse tipologie di materiali, definiti dalla norma tecnica (UNI, 1999) e indicati dal D.M. 10/05/2001 (Ministero della Cultura, 2001);
- analizzare le escursioni giornaliere di temperatura e umidità relativa e confrontarle con i valori indicati nella stessa norma UNI;
- confrontare le condizioni microclimatiche con l'andamento della temperatura e dell'umidità relativa dell'ambiente esterno alla Villa, per valutare l'inerzia delle strutture di copertura (vecchie e nuove coperture) rispetto alle sollecitazioni esterne (escursioni giorno-notte e fluttuazioni stagionali).

Il rilievo microclimatico degli ambienti esaminati è stato effettuato utilizzando sonde datalogger HOBO® U12-011 (Onset, Cape Cod, Massachusetts, US) a 2 canali, in grado di registrare in modo automatico e continuo i valori di temperatura e umidità relativa. Le sonde sono state poste *in situ* a 150 cm di altezza da terra nella Stanza 35 e in altri locali, e a circa 200 cm

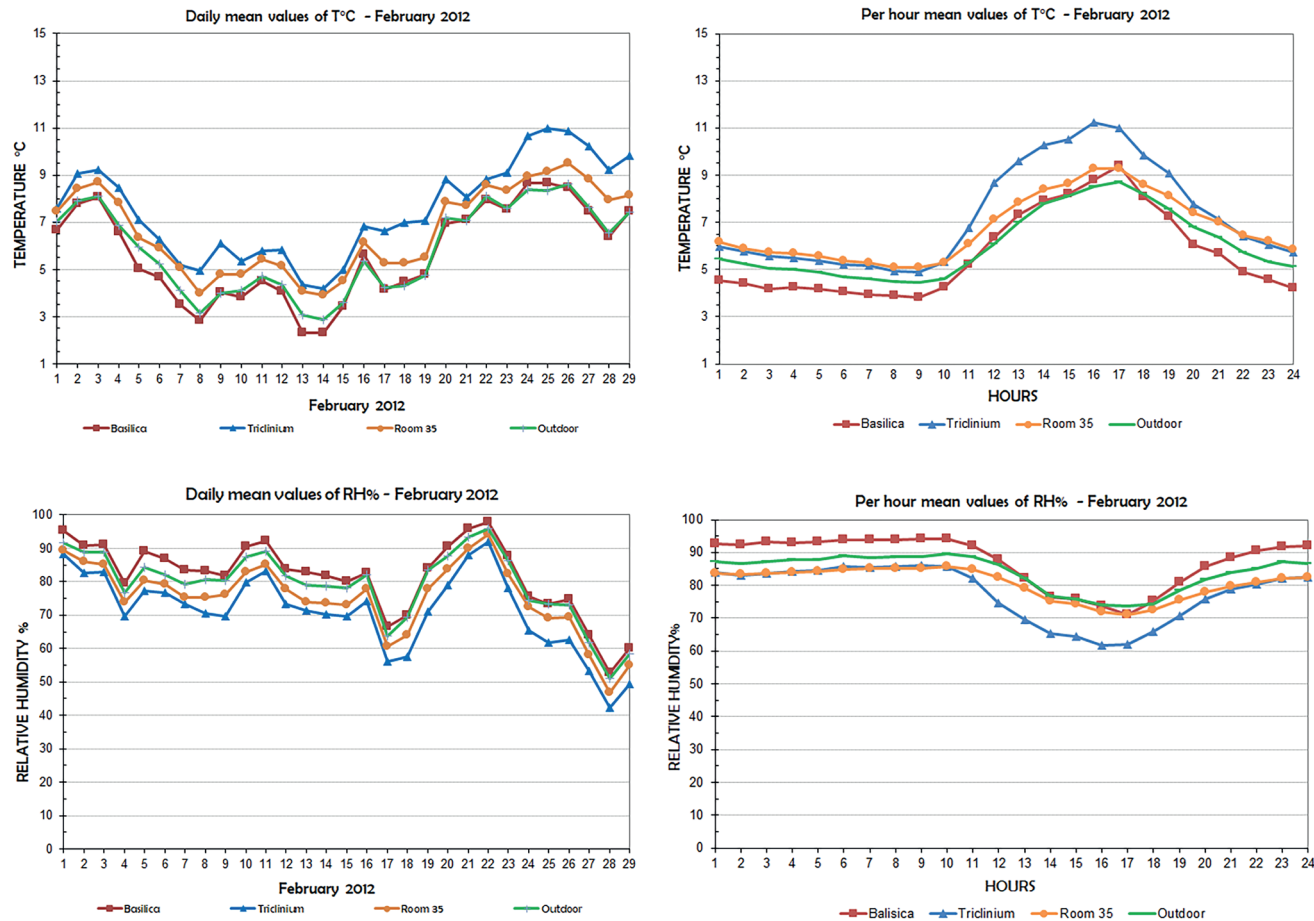
in Basilica e *Triclinium*, dopo un primo sopralluogo necessario per individuare i punti di campionamento più significativi per il rilievo microclimatico degli ambienti sotto esame secondo la normativa tecnica [4, 5, 18]. Una sonda è stata posizionata all'esterno in modo da poter valutare anche l'inerzia degli ambienti interni rispetto alle variazioni climatiche esterne. In particolare, i risultati presentati nel paragrafo seguente sono stati elaborati confrontando i dati di UR% e T°C tra vecchie e nuove soluzioni di copertura e con i valori di questi parametri consigliati per mosaici e pitture murali dal D.M. 10/05/2001 (Ministero della Cultura, 2001): T°C range 6 ÷ 25; UR% range 45 ÷ 60; $\Delta T^{\circ}1,5$ e $\Delta RH\% 10$ (UNI 1999). Tuttavia, i valori raccomandati sono individuati per ambienti confinati. Mantenere questi stessi valori in ambienti semiconfinati in aree caratterizzate da clima mediterraneo, senza sistemi di climatizzazione, è evidentemente difficile. I valori sono stati comunque utilizzati come riferimento di massima per determinare se il microclima generato dalle nuove coperture fosse favorevole alla conservazione degli apparati decorativi e alla loro fruizione. Una regola generale – adottata anche in questo caso – è quella di considerare valori ottimali quelli con le variazioni più basse, poiché brusche fluttuazioni di UR% e T°C producono fenomeni indesiderati, come la contrazione e la dilatazione dei materiali da costruzione e l'immediato disagio del fruitore. I dati sono stati elaborati calcolando per ogni giorno: valori di temperatura minima, massima e media; valori di umidità relativa minima, massima e media; umidità

specifica; punto di rugiada; escursioni giornaliere di temperatura ($\Delta T^{\circ}\text{C}$) e di umidità relativa ($\Delta \text{UR}\%$). Il contestuale rilievo e il successivo confronto tra i parametri ambientali relativi al sistema di copertura in metacrilato già esistente e quelli prodotti dalla nuova soluzione di copertura, hanno consentito di verificare le nuove condizioni microclimatiche ottenute dopo la sostituzione della copertura obsoleta e deteriorata.

4. Risultati del monitoraggio microclimatico dopo gli interventi conservativi

L'analisi dei dati ottenuti dalla campagna di monitoraggio del C.R.P.R. nel 2003/2004 [14, 15, 16] relativa all'andamento giornaliero e stagionale, ha evidenziato l'assenza di inerzia termica della struttura di copertura. Il microclima è stato influenzato dalla presenza di ampie zone di accesso che collegavano l'interno con l'esterno dell'edificio. Parallelamente, nel monitoraggio microclimatico del 2004, è stato confermato un accentuato effetto serra dovuto alle strutture di copertura, soprattutto in alcuni ambienti poco ventilati, come la Basilica dove, nei mesi estivi, le temperature registrate sono state anche di 20°C superiori rispetto alle temperature esterne massime rilevate. Partendo da queste evidenze documentate, il secondo monitoraggio annuale ha permesso di fornire una panoramica del microclima del sito archeologico della Villa del Casale, verificando e documentando gli effetti migliorativi delle azioni di conservazione preventiva, dopo la sostituzione

delle vecchie coperture. I dati della campagna annuale di monitoraggio microclimatico settembre 2011 - settembre 2012, hanno evidenziato chiaramente la totale assenza dell'effetto serra negli spazi sormontati dal nuovo sistema di copertura, anche se, dal confronto con i dati esterni, non in tutti gli ambienti della Villa hanno mostrato sufficiente inerzia termica. Queste evidenze sono state riscontrate sia per i mesi invernali che per quelli estivi. Esempio è il caso della Stanza 35, dove la sua copertura è stata sostituita nell'aprile 2012. In questo ambiente, infatti, si è manifestata un'evidente variazione del comportamento termoigrometrico, precedentemente simile a quello del *Triclinium* (fino ad aprile 2012), e successivamente, le condizioni del suo microclima sono risultate allineate a quelle della Basilica. In figura 4 sono riportati i valori medi di $T^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR}\%$ registrati a febbraio 2012 rispettivamente per il *Triclinium*, la Basilica e la Stanza 35 confrontati con i dati acquisiti all'esterno, rispettivamente, negli stessi periodi. Si può notare che per la Basilica i valori medi di temperatura e umidità relativa sono stati prossimi ai rispettivi valori medi esterni. Il *Triclinium* e la Stanza 35 hanno mostrato chiaramente, per l'intero andamento mensile, un sistematico aumento della temperatura e una contemporanea diminuzione dell'umidità, rispetto ai valori rilevati all'esterno. Al contrario, come mostrato in figura 5, i valori medi giornalieri e orari di temperatura e umidità relativa registrati ad agosto 2012 mostrano chiaramente l'assenza di effetto serra anche nella Stanza 35. Infatti, nel *Triclinium*, che aveva ancora la vecchia copertura in metacrilato,



si è osservato un sistematico aumento della temperatura, nonché una contemporanea diminuzione dell'umidità, rispetto ai valori rilevati all'esterno, nella Basilica e nella Stanza 35 nello stesso periodo. Come si vede chiaramente nelle figure 6 e 7, durante tutto l'anno si è registrato il caratteristico andamento dell'UR% che aumenta durante la notte e diminuisce durante

il giorno, al contrario di quello rilevato per la temperatura. L'UR% è vicina ai valori ottimali in primavera e in estate. Tuttavia, durante l'intero periodo monitorato, il problema principale è chiaramente rappresentato dalla variazione consistente del valore di UR% durante il corso della giornata. I valori di temperatura sono apparsi più vicini ai valori ottimali, ad eccezione

Fig. 4 Valori medi giornalieri e orari di temperatura T°C e umidità relativa UR% registrati a febbraio 2012 per Basilica, *Triclinium* e Stanza 35 rispetto agli andamenti rilevati all'esterno della Villa.

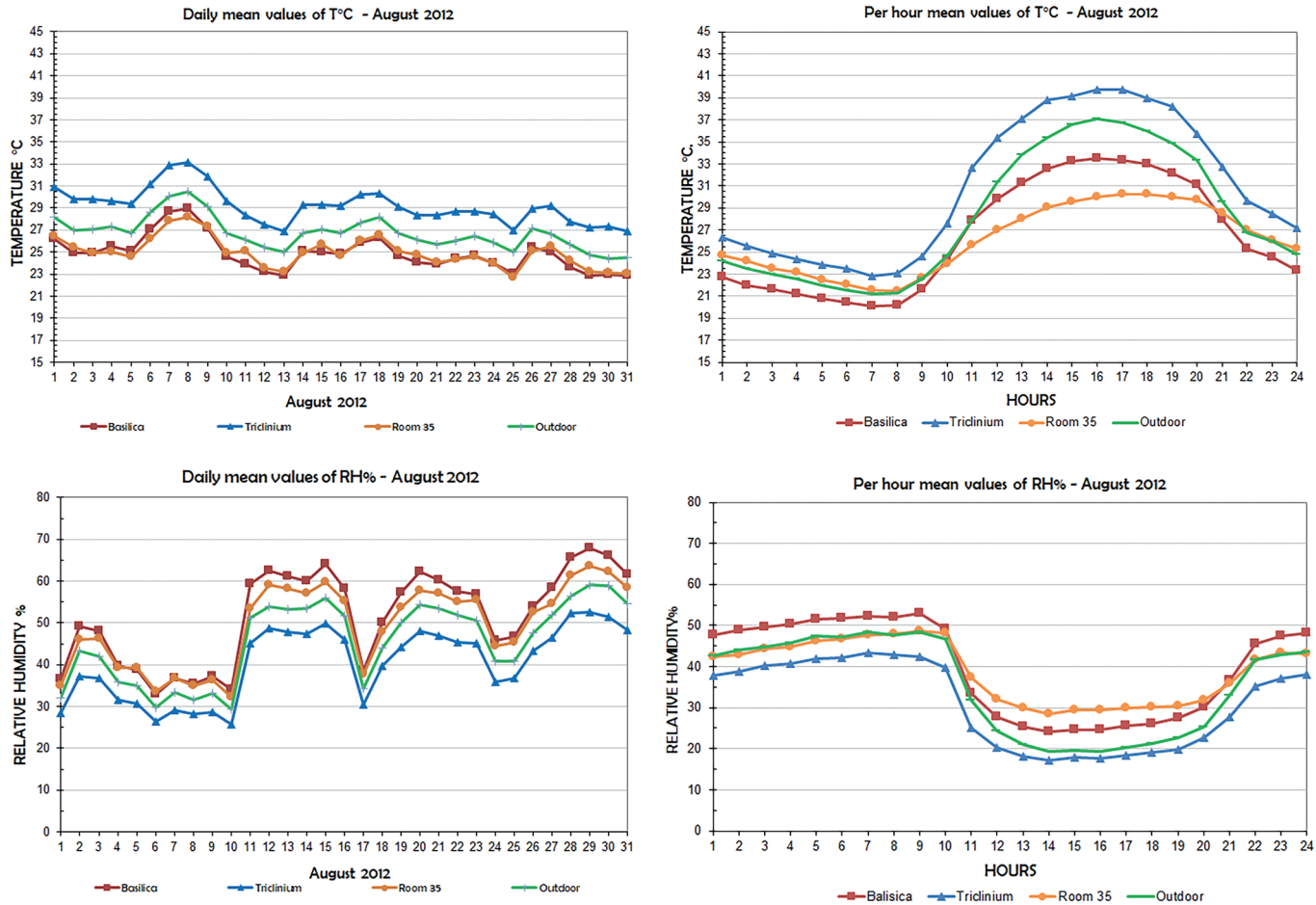
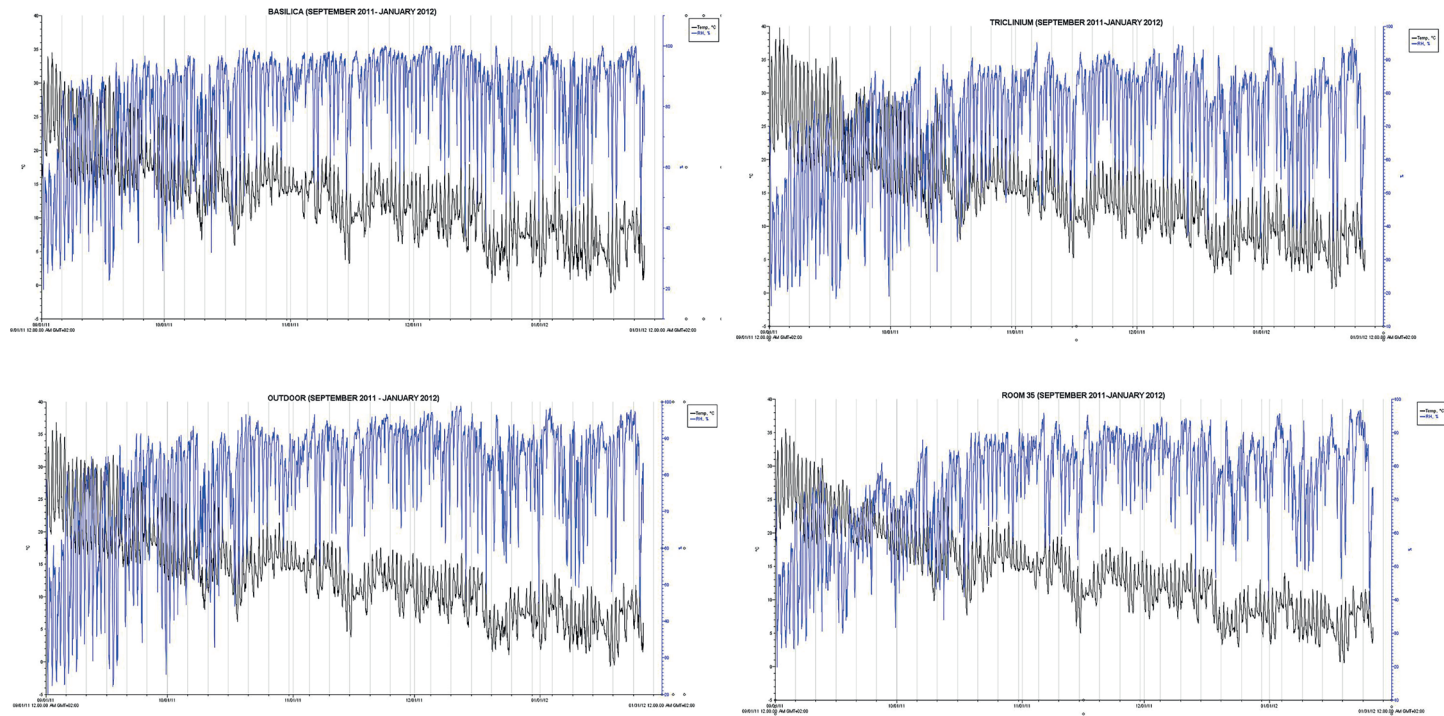


Fig. 5 Valori medi giornalieri e orari di temperatura T°C e umidità relativa UR% registrati ad agosto 2012 per Basilica, *Triclinium* e Stanza 35 rispetto agli andamenti rilevati all'esterno.

dell'estate quando raggiungono i valori massimi. Le basse temperature durante il mese invernale unite all'alto valore di UR% si sono rivelate la principale causa di fenomeni di condensazione sulle superfici lapidee dei mosaici. Inoltre,

come prevedibile in un clima tipicamente mediterraneo, sono state osservate brusche fluttuazioni di UR% e T°C all'esterno che influenzano in maniera omotetica i valori nell'ambiente interno.



I grafici dei valori termoigrometrici orari registrati sia per il periodo autunno-inverno (Fig. 6) che primavera-estate (Fig. 7) hanno mostrato che le oscillazioni termoigrometriche giornaliere interne sono molto simili a quelle esterne, fatta eccezione per la Stanza 35 nel secondo periodo (Fig. 7), per la sostituzione del sistema di copertura (per questo ambiente nell'aprile 2012), caratterizzato da una diminuzione degli scambi notte-giorno. Questo era infatti il secondo effetto atteso – oltre all'eliminazione dell'effetto serra – dovuto al nuovo sistema di copertura: uniformare le variazioni giornaliere

esterne di UR% e T°C per ottenere un ambiente il più stabile possibile.

Per quanto riguarda la Basilica, la sostituzione della copertura ha generato un lieve miglioramento dell'inerzia alle sollecitazioni esterne, sia in termini di temperatura che di umidità relativa. Ciò può essere correlato alle grandi dimensioni del locale e alle ampie aperture, che favoriscono gli scambi termici diretti con l'esterno e con altri ambienti semiconfinati, rendendo più difficile il mantenimento di condizioni termoigrometriche stabili nella Stanza 35.

Fig. 6 Grafici dei valori di temperatura (T°C, linea nera) e umidità relativa (UR%, linea blu) registrati per ora nell'intero periodo settembre 2011 - gennaio 2012 dalle 4 sonde poste in situ: Basilica, Triclinium, Stanza 35, Esterno.

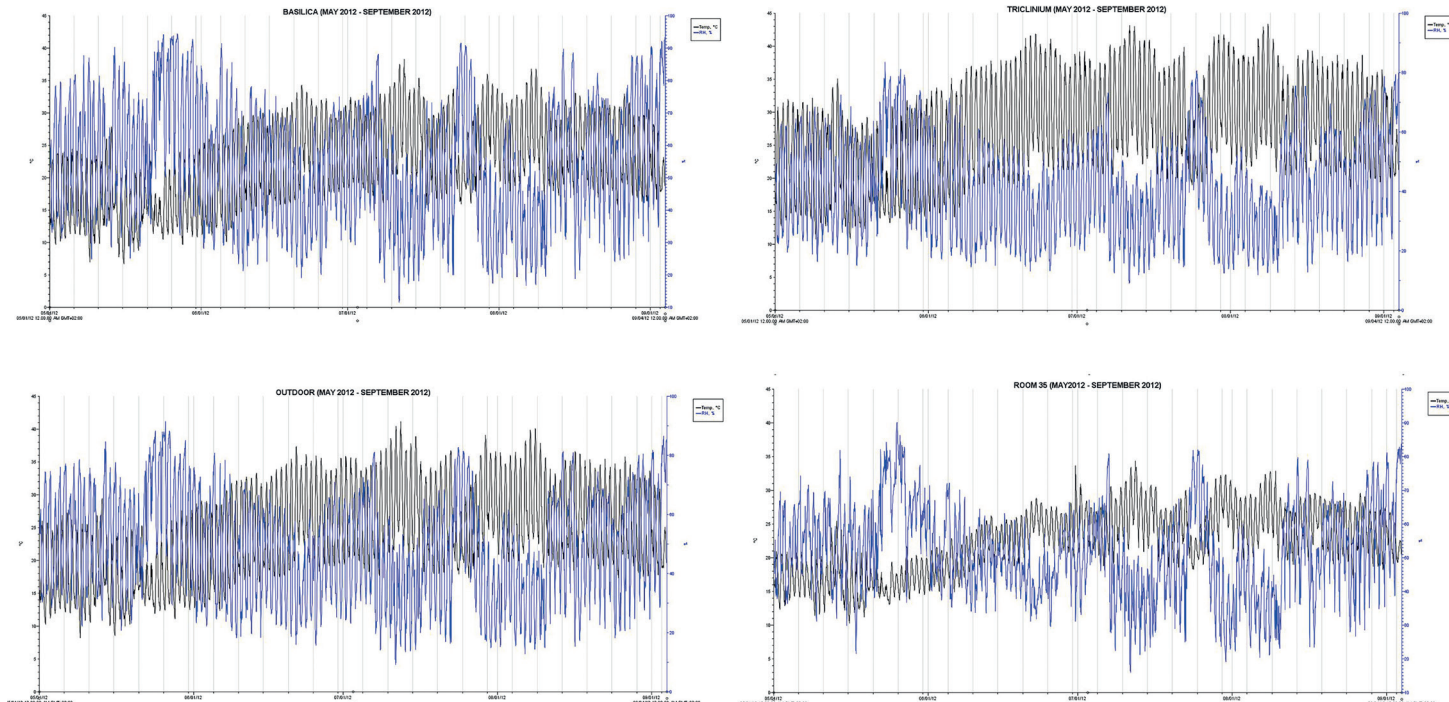
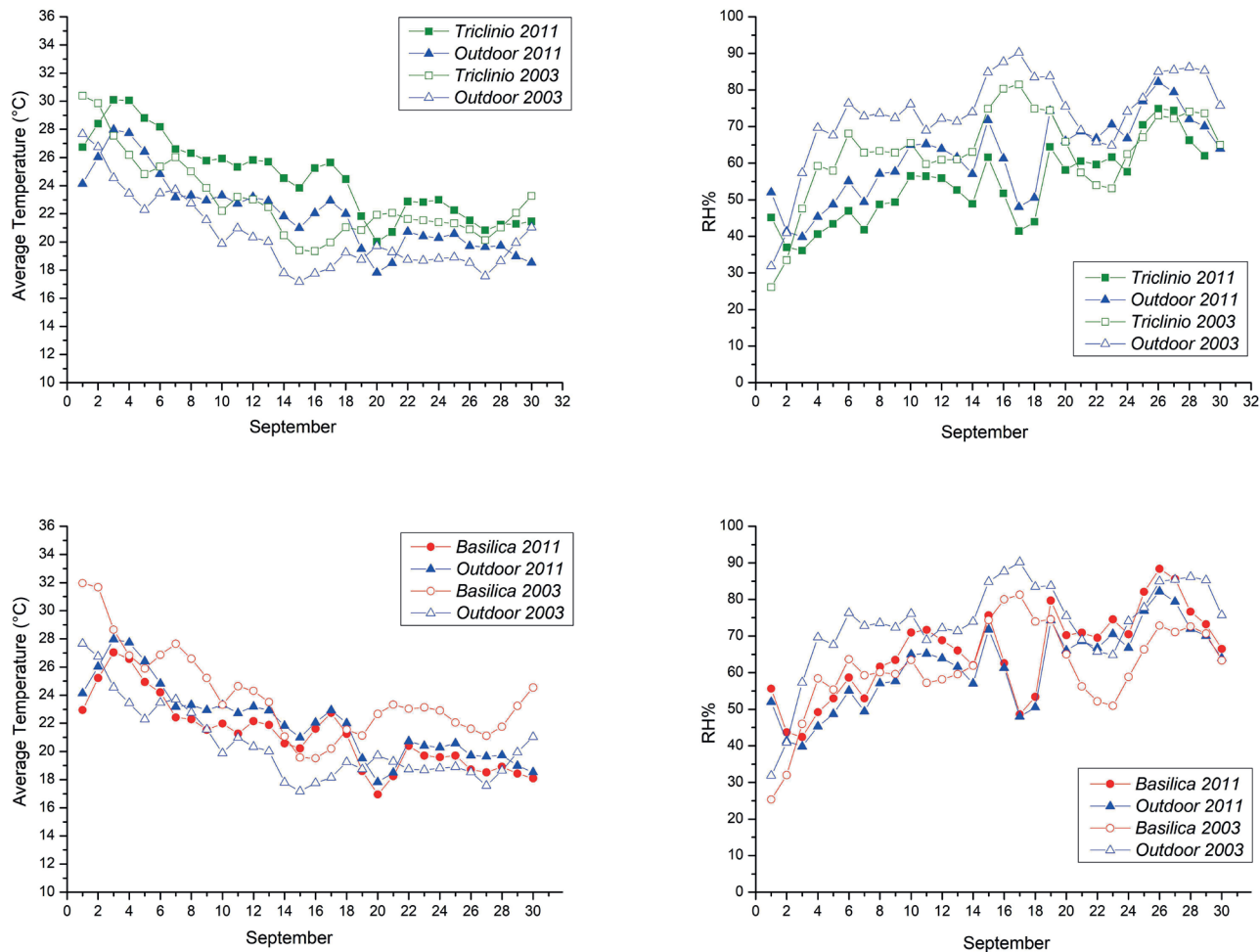


Fig. 7 Grafici dei valori di temperatura ($T^{\circ}\text{C}$, linea nera) e umidità relativa (UR%, linea blu) registrati per ora nell'intero periodo maggio 2012-settembre 2012 dalle 4 sonde poste in situ: Basilica, Triclinium, Stanza 35, Esterno.

Verificato il miglioramento delle condizioni ambientali negli ambienti monitorati grazie alle nuove condizioni strutturali, è stato previsto un nuovo confronto dei valori termometrici rilevati negli stessi ambienti durante la campagna 2003/2004 [14, 15, 16]. Questa elaborazione dei dati ha permesso di rendere evidente l'effettivo

miglioramento attribuibile alle nuove coperture rispetto alle precedenti condizioni generate dalla vecchia struttura.

Dai grafici riportati in figura 8, infatti, è possibile notare come, per il *Triclinium*, non sia riscontrabile il miglioramento delle condizioni ambientali del complesso archeologico



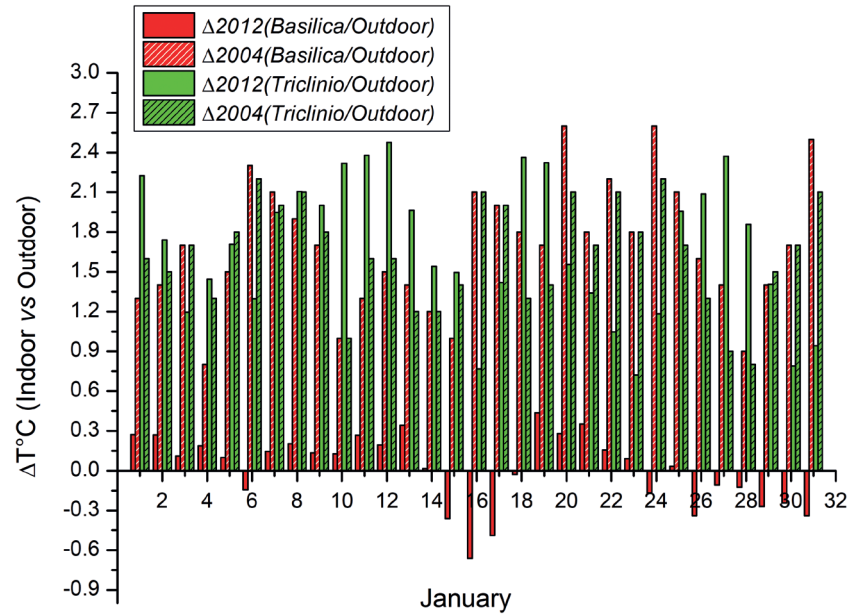
generate dal nuovo sistema di coperture e già verificato per la Basilica, come risulta evidente grazie ai confronti, sia per la temperatura che per l'umidità relativa, tra i valori medi acquisiti nel settembre 2011 e quelli del 2003, nel gennaio 2012 e quelli del 2004, e i corri-

spettivi andamenti registrati all'esterno della Villa.

Le evidenze relative alle differenze di temperatura fra gli ambienti interni e l'esterno, calcolate sia per i valori medi del 2004 che per quelli del 2012, mettono in luce le migliorate

Fig. 8 Valori medi di temperatura e umidità relativa rilevati a settembre 2011 rispettivamente per il *Triclinium*, la Basilica e l'esterno della Villa, confrontati con i dati acquisiti negli stessi ambienti durante il precedente monitoraggio microclimatico (2003/2004).

Fig. 9 Differenze di temperatura ($\Delta T^{\circ}\text{C}$) fra gli ambienti interni, Basilica e *Triclinium*, e i corrispondenti valori misurati all'esterno, calcolate sia per i valori medi del 2004 che per quelli del 2012.



condizioni ambientali dovute al recente intervento di recupero, come mostrato per esempio per il mese di gennaio riportato nel grafico in figura 9.

5. Conclusioni

Il monitoraggio microclimatico della Villa del Casale è stato effettuato per la durata di un anno al fine di garantire la significatività dei dati rispetto alla reale condizione climatica che caratterizza questo sito archeologico. I dati hanno documentato gli effetti che l'intervento di restauro, concluso nel 2012, ha prodotto all'inter-

no di questo complesso sistema fisico. Come previsto per la tipologia di sito (semiconfinato), i valori termometrici registrati in tutti gli ambienti interni nel periodo monitorato sono stati, anche se in modo più o meno evidente, lontani dai *range* consigliati per la conservazione dei mosaici e pitture murali. Il monitoraggio ha inoltre evidenziato una scarsa inerzia rispetto alle condizioni esterne, determinando elevate escursioni giornaliere e stagionali. Tuttavia, i risultati dello studio hanno mostrato come l'intervento abbia influito positivamente sulle condizioni microclimatiche, più idonee sia alla corretta conservazione del sito che ai visitatori. In particolare, è stata risolta la condizione più

critica, legata all'effetto serra, soprattutto nel periodo estivo. Ciò consente di evitare il conseguente stress fisico-meccanico dei materiali e la migrazione dei sali solubili dovuti ai valori UR% inferiori e ai valori di T°C più elevati negli ambienti interni, rispetto alle condizioni ambientali esterne.

Si può quindi affermare che l'intervento di rifacimento delle coperture ha migliorato il microclima interno applicando i principi base dell'architettura bioclimatica e utilizzando materiali compatibili con il contesto archeologico. Oltre all'eliminazione della radiazione ultravioletta e dell'effetto serra, sono stati ridotti i carichi termici interni, principalmente grazie alla

circolazione e al ricambio dell'aria, realizzata attraverso un sistema di ventilazione naturale passiva. Il raffreddamento e il controllo dell'umidità risultano dal moto convettivo prodotto dalle differenze termiche, e dall'effetto Venturi, generato in corrispondenza delle aperture alla base delle pareti di tamponamento e dei camini sul tetto. Le scelte tecnologiche sono rafforzate dall'utilizzo di alcuni materiali naturali a basso impatto ambientale (legno e fibre vegetali), e di materiali riciclabili (acciaio e rame). Insieme ai vantaggi sopra descritti, la nuova soluzione di copertura può contribuire a facilitare la gestione del complesso museale.

Bibliografia

1. Lucchi, E., Roberti, F., *Diagnosi, simulazione e ottimizzazione energetica degli edifici storici Energy diagnosis, simulation and optimization of historic buildings*, **2016**.
2. Camuffo, D., Pagan, E., Rissanen, S., Bratasz, Ł., Kozłowski, R., Camuffo, M., Della Valle, A., *An advanced church heating system favourable to artworks: A contribution to European standardisation*, in *Journal of Cultural Heritage* 11, **2010**, pp. 205–219.
3. Caterina, G., *Tecnologie di intervento per il recupero di Ortigia*, in *Atti del seminario di Studi della Scuola di Alta Formazione organizzato dalla Facoltà di Architettura di Siracusa e dall'Istituto Italiano per gli Studi Filosofici*, **2003**.
4. Ente Italiano di Normazione, *UNI 10829:1999 Beni di interesse storico e artistico. Condizioni ambientali per la conservazione – Misure ed analisi*, **1999**.
5. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 15758:2010 Conservation of Cultural Property – Procedures and instruments for measuring temperatures of the air and the surfaces of objects*, **2010**.
6. Repubblica Italiana, Ministero della Cultura, *Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei* (art. 150, comma 6, D.L. del 1998, n. 112), 2001.
7. Aghemo, C., Filippi, M., Prato, E., *Condizioni ambientali per la conservazione dei beni di interesse storico e artistico. Ricerca bibliografica comparata*, Comitato Giorgio Rota, **1996**.
8. Amoroso, G., Camaiti, M., *Il degrado dei monumenti in Trattato di scienza della conservazione dei monumenti. Etica della conservazione, degrado dei monumenti, interventi conservativi, consolidanti e protettivi*, Alinea editor, Florence, **2002**.
9. Regione Sicilia, Centro Regionale Prog. E Restauro Bb.Cc., Meli, G. (ed.), *Progetto di recupero e conservazione della Villa Romana del Casale di Piazza Armerina*, Collana I Quaderni di Palazzo Montalbo. I Grandi Restauri, 12/1, Assessorato BB. CC. AA., **2007**.
10. Germanà, M. L., *Archaeological constructions and its relationship with place: the theme of shelters / Costruito archeologico e rapporto con il luogo: il tema delle coperture*, in Ruggieri Tricoli M. C., Germanà M. L. (eds.), *Urban Archaeology Enhancement, Valorizzare l'archeologia urbana*, ETS, **2013**, pp. 186-207.
11. Nicolini, E., Germanà, M. L., Alberghina, M. F., Schiavone, S., and Prestileo, F., *Microclimatic monitoring for archaeological shelters, across indoor comfort and conservation: the case study of the Villa del Casale in Piazza Armerina (Sicily, Italy)* in *Book of Abstracts submitted to the 6th edition of the international conference on Conservation of Architectural Heritage (CAH)*, **2022**.
12. Gugliermetti, F., *Il microclima in Regione Sicilia in Centro Regionale Prog. E Restauro Bb.Cc.*, Meli, G. (ed.), *Progetto di recupero e conservazione della Villa Romana*

- del Casale di Piazza Armerina, Collana I Quaderni di Palazzo Montalbo, i Grandi Restauri, **2007**, n. 12/1, pp. 223-234.
13. Rizzi, G., *Sheltering the mosaics of Piazza Armerina: issues of conservation and presentation*, in Archaeological Institute of America, <https://www.archaeological.org/sheltering-the-mosaics-of-piazza-armerina-issues-of-conservation-and-presentation/>, **2008**.
 14. Prestileo, F., *Rilevamenti microclimatici. La Villa Imperiale del Casale in Regione Sicilia*, Centro Regionale Prog. E Restauro Bb.Cc., Informa. Periodico del Centro Regionale per la Progettazione e il Restauro, gennaio-giugno, **2005**, pp. 22-23.
 15. Cacciatore, E., Prestileo, F., *Indagini fisiche*, in Regione Sicilia in Centro Regionale Prog. E Restauro Bb.Cc., Meli, G. (ed.), Progetto di recupero e conservazione della Villa Romana del Casale di Piazza Armerina, Collana I Quaderni di Palazzo Montalbo, i Grandi Restauri, n. 12/1 **2007**, pp. 97-104.
 16. Cacciatore, E., Prestileo, F., Bruno, G., Pellegriano, L., Perrone, D., Alberghina, M. F., Schiavone, S. *Monitoring the decorated surfaces of the Roman "Villa del Casale" in Piazza Armerina (Italy)*, in Tiano, P.; Pardini C.; (eds.), SMW08 In Situ Monitoring of Monumental Surfaces, Proceedings of International Workshop Florence, 27-29 October, Edifir Edizioni, **2008**, pp. 301-306.
 17. Alberghina, M.F., Cacciatore, E., Meli, G., Prestileo, F., Schiavone, S, *Prime evidenze analitiche degli effetti positivi prodotti dal nuovo sistema di coperture sul microclima della Villa Romana del Casale di Piazza Armerina (EN)*. In G. Biscontin (Ed.), La conservazione del patrimonio culturale all'aperto, Atti del 28° Convegno Internazionale Scienza e Beni Culturali, Bressanone, Ed. Arcadia Ricerche, **2012**, pp. 281-290.
 18. Ente Italiano di Normazione, *UNI EN 16242:2012, Conservation of Cultural Heritage – Procedures and instruments for measuring humidity in the air and moisture exchanges between air and cultural property*, **2012**.

Verifica della prestazione di isolamento termico di una parete ventilata con muro verde anche durante condizioni climatiche altamente soleggiate, ventose e piovose

Elvira Nicolini¹

¹ Ricercatrice presso il Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Palermo, Italia

The goal of the present paper is the verification of the improvement of the performance of a building envelope with a green wall also in conditions of high irradiance ($\geq 0.6 \text{ kW/m}^2$) and with variable meteorological conditions (sunny, cloudy, windy and rainy), with a focus on intense rainfall and tempest. The object of the analysis has been the Innovation and Technology for Development Center in the University Campus of the Polytechnics of Madrid, where a modular system of integrated vertical vegetation has been installed on the skin of the South and West prospects. The study is based on the analysis of the effective thermoregulation capacity of the system in different climatic situations and has been

allowed by a database covering a 3-year period, which contains data from continuous monitoring of the meteorological variations and thermal flows through a weather station and sensors placed on the external surface of the envelope, and on the external and internal surfaces of the wall. The experimentation shows that the use of a green wall on the West prospect is even more valid in conditions of high irradiance, as it allows reducing the temperature of the wall by 10°C , compared to the scenario without the green wall. The study shows a slight difference between the south and west exposures, particularly during the summer, when the effect of irradiation is more incident on the south side and is amplified by hot winds.

1. Introduzione

Lo stato dell'arte presenta poche analisi sulle condizioni microclimatiche e alcune tra queste esaminano i fenomeni che si verificano nell'intercapedine tra il paramento murario dell'edificio e la facciata verde, dove sembra verificarsi una variazione di umidità, temperatura e velocità del vento, creando un microclima per le stagioni primaverili ed estive, caratterizzato da temperatura più bassa e maggiore umidità [1, 2, 3]. Peraltro, le ricerche pregresse e in atto tendono a basare le proprie conclusioni su dati sperimentali provenienti da monitoraggi o simulazioni, con periodi di controllo brevi e incentrati sulla primavera-estate [4, 5, 6, 7], rendendo impossibile la conoscenza del comportamento della parete verde in altre stagioni, condizione a sua volta necessaria per lo studio del bilancio termico globale dell'edificio [8].

Lo studio presentato nel presente contributo si basa su un monitoraggio continuo, svolto per un triennio. Il lungo tempo di monitoraggio ci ha consentito di rilevare il comportamento della parete verde anche in situazioni meteorologiche che per un clima temperato sono eccezionali, ma che per uno subtropicale, ad esempio, sono frequenti. In particolare, ci si focalizza sulle condizioni di meteo variabile, elevato irraggiamento, intense piogge e intenso vento, situazione combinata irraggiamento-pioggia, ragionando sulla differenza di comportamento di un involucro edilizio in un punto con parete verde e in un punto privo.

Lo studio ha come oggetto alcuni ambienti

del Centro Innovazione e Tecnologia per lo Sviluppo (itdUPM), ubicato nel Campus Moncloa dell'Università Politecnica di Madrid (UPM), dove, in corrispondenza dei prospetti sud, est e ovest, è stato installato un sistema modulare di facciata vegetale, già brevettato e in commercio, denominato BIOFIVER. Il monitoraggio diurno e notturno, in tempo reale, delle variazioni dei parametri esterni e dei flussi-termici, ci hanno consentito di analizzare gli effetti di capacità di termoregolazione passiva con diverse situazioni meteorologiche, attraverso un database che copre un triennio (dal 2016 al 2019). L'edificio itdUPM ospita un centro interdisciplinare in grado di integrare le diverse linee di ricerca nei campi della tecnologia e dello sviluppo sostenibile e dispone di spazi per la didattica, sale riunioni e laboratori. L'edificio, frutto di una riabilitazione energetica effettuata nel 2016, è stato realizzato con l'obiettivo di raggiungere un consumo energetico quasi zero. L'involucro è costituito da un muro portante in laterizio, rivestito con una lamiera forata in alluminio ancorata su profili a L [9]. Tra il muro e la lamiera vi è un'intercapedine di 20 cm. Per il miglioramento della trasmittanza termica è stato aggiunto successivamente uno strato di lana di vetro sul lato interno delle pareti esistenti e una parete verde in parte delle pareti esposte a ovest, a sud e a est. La parete verde installata è un sistema modulare di 50*50*10 cm e occupa 11,25 m² nella facciata sud, 6,25 m² a est e 10 m² a ovest. Il sistema è composto da due strutture tridimensionali di celle di polipropilene, separate da un tessuto di poliestere idrofilo e la struttura frontale è riempita con sub-



strato organico arricchito per la coltivazione di piante, selezionate in base all'adattamento al contesto climatico di riferimento. Il sistema è dotato di un impianto di irrigazione per essudazione, che consente di approvvigionare uniformemente l'intera superficie.

Con l'obiettivo di monitorare l'efficienza della parete verde, è stato installato un sistema di sensori nelle pareti esposte a ovest e a sud che permette di registrare le temperature sulla skin e sul wall, in presenza e assenza di parete verde e su due esposizioni diverse, sud e ovest. I sensori sono stati collocati sulla superficie esterna dell'involucro, su quelle esterna ed interna del paramento murario. I dati raccolti hanno un dettaglio al minuto calcolato come la media delle rilevazioni effettuate ogni dieci secondi in ogni nodo del sistema di monitoraggio collega-

to. In particolare, ogni nodo è collegato ad otto termocoppie di tipo T permettendo una risoluzione di $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3 pirometri con risoluzione $0.1\text{W}/\text{m}^2$ ed una centralina meteo.

2. Discussione

2.1.1 Dati di partenza

I dati analizzati per studiare la relazione degli eventi meteorologici estremi, in aggiunta alle temperature del muro, sono stati raccolti tramite un sistema di monitoraggio rimasto attivo nel periodo giugno 2016 – febbraio 2019. Ogni dato esprime la variabile misurata al minuto, per entrambe le facciate sud e ovest. Tale dettaglio ha permesso di effettuare analisi statistiche mirate combinando i di versi effetti di irraggia-

Fig. 1 Edificio del Centro Innovazione e Tecnologia per lo Sviluppo (itdUPM), ubicato nel Campus Moncloa Universitario del Politecnico di Madrid (UPM); (a) Planimetria generale (Elaborazione grafica di Elvira Nicolini); (b) parete verde sulle pareti esposte a est e a sud (Immagini di itdUPM <https://www.itd.upm.es/>).

mento, vento e pioggia, sia marginalmente che in maniera congiunta. Tutte le analisi sono state effettuate utilizzando il software statistico R [10]. Per utilizzare i dati in modo appropriato è stato prima necessario pulire il dataset da tutte le osservazioni anomale probabilmente dovute ad errori di misurazione o manutenzione dei

sensori. In particolare, tutti i record in cui sono state registrate temperature superiori a 1800 °C, livelli altimetrici di pioggia negativi oppure livelli di irraggiamento superiori 1300 w/m², sono stati eliminati. Le variabili disponibili nel dataset finale, che consta di circa un milione di osservazioni, sono descritte nella Tabella 1 in

Variabili	Descrizione
Date, Time	Data and Time of the measurement
$T_{S_G_Wall}$, $T_{S_G_Skin}$	Temperature of the Green wall and skin, respectively, measured in the South Side
$T_{S_B_Wall}$, $T_{S_B_Skin}$	Temperature of the Bare wall and skin, respectively, measured in the South Side
$T_{W_G_Wall}$, $T_{W_G_Skin}$	Temperature of the Green wall and skin, respectively, measured in the West Side
$T_{W_B_Wall}$, $T_{W_B_Skin}$	Temperature of the Bare wall and skin, respectively, measured in the West Side
Precipitation	Maximum altimeter level of flow and storm precipitation (mm/h) or Binary variable indicating absence ("=0") or presence (">0") of precipitation
Irradiance	Irradiance level (kw/m ²)
Wind Speed	Wind Speed (km/h) or Binary variable indicating absence ("=0") or presence (">0") of wind
Wind Scale	Multilevel variable indicating increasing levels of wind speed, "Calm" when wind speed is less than 2 km/h, "Light breeze" for speed between 2 and 12 km/h and "Moderate breeze" when greater than 12 km/h.
Wind Direction	Wind cardinal direction, obtained from the degree directions
Day Night	Binary variable indicating "Day" corresponding to the following hours and season (Autumn 06:00-20:00, Spring 06:00-20:00, Summer 05:00-21:00, Winter 07:00-18:00) and "Night" otherwise.

Tabella 1 Sintesi delle variabili ricavabili dal data set e delle variabili ausiliarie costruite sulla base dei dati originali con l'obiettivo di approfondire le analisi di interazione degli effetti di irraggiamento e precipitazione.

cui, oltre alle misurazioni iniziali, sono state aggiunte delle variabili ausiliarie costruite sulla base dei dati originali con l'obiettivo di approfondire le analisi di interazione degli effetti di irraggiamento, vento e precipitazione.

Tutte le variabili aggiuntive sono state costruite osservando le rappresentazioni grafiche delle misurazioni coinvolte; ad esempio, la distinzione della fascia orario giorno-notte è utile per annullare l'effetto di irraggiamento.

Simbolo	Descriptione
G	Green Wall
B	Bare Wall
S	South Orientation
W	West Orientation
Wall	Posizione del sensore in corrispondenza della superficie esterna del paramento murario (vedi fig. 1d)
Skin	Posizione del sensore in corrispondenza della superficie esterna dell'involucro di rivestimento del paramento murario (vedi fig.1d)
ΔT	Temperature difference between Bare and Green wall for each orientation ($\Delta T_S = T_{S_B_Wall} - T_{S_G_Wall}$ and $\Delta T_W = T_{W_B_Wall} - T_{W_G_Wall}$ corresponding to South and West, respectively)
ΔT^*	Temperature difference between skin and wall, with respect to a specific wall (i.e. $\Delta T^B = T_{B_Skin} - T_{B_Wall}$ and $\Delta T^G = T_{G_Skin} - T_{G_Wall}$ corresponding to Bare and Green respectively)
ΔT_e^*	Difference between external temperature and wall, with respect to a specific wall (i.e. $\Delta T_e^B = T_e - T_{B_Wall}$ and $\Delta T_e^G = T_e - T_{G_Wall}$ corresponding to Bare and Green wall respectively)

Tabella 2 Sintesi degli acronimi, con relativa descrizione, utilizzati per l'elaborazione dei dati.

2.2.2 Elaborazione dei dati

Grafico 1 Serie Temporale ΔT^* nel triennio

Y: Valori ΔT^* : espresso in $^{\circ}\text{C}$ è la differenza di temperatura segnalata dal sensore S_Skin e S_Wall.

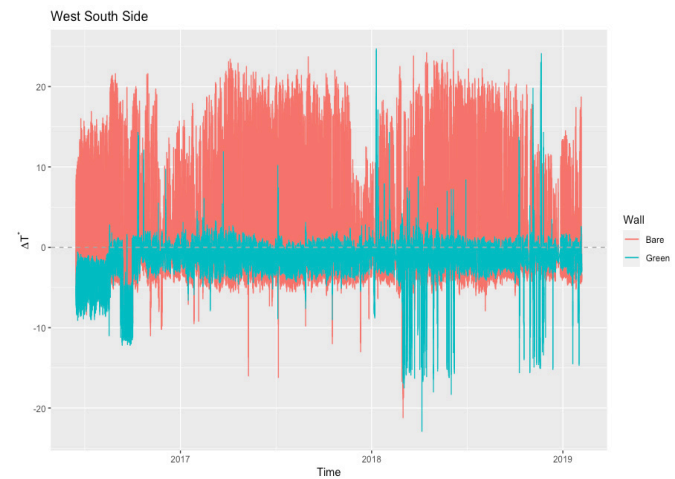
X: Time.



In rosso, dove non c'è la parete verde c'è una maggiore variabilità di ΔT^* superficiale e quindi una maggiore escursione termica tra l'involucro e il paramento murario durante il triennio.

Y: Valori ΔT^* : espresso in $^{\circ}\text{C}$ è la differenza di temperatura segnalata dal sensore W_Skin e W_Wall.

X: Time.

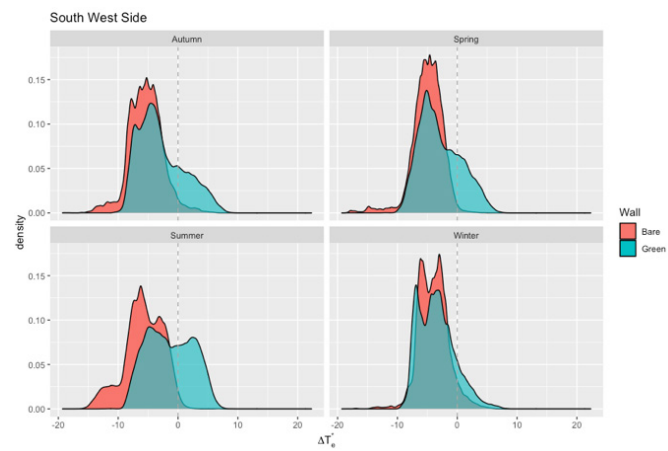


Nel lato West il ΔT^* è leggermente minore (di 5 $^{\circ}\text{C}$). Dove c'è la parete verde (in verde) si conferma una maggiore uniformità tra l'involucro e il paramento murario.

Grafico 2 Distribuzione ΔT_e^* per stagione

Y: Densità: proporzionale alla frequenza nel corso del triennio con la quale si presenta un certo valore del ΔT .

X: Valore ΔT : espresso in $^{\circ}\text{C}$ è la differenza di temperatura tra quella esterna e quella segnalata dai sensori posti a South (S_B_Wall corrispondente al muro senza green wall e S_G_Wall con green wall).

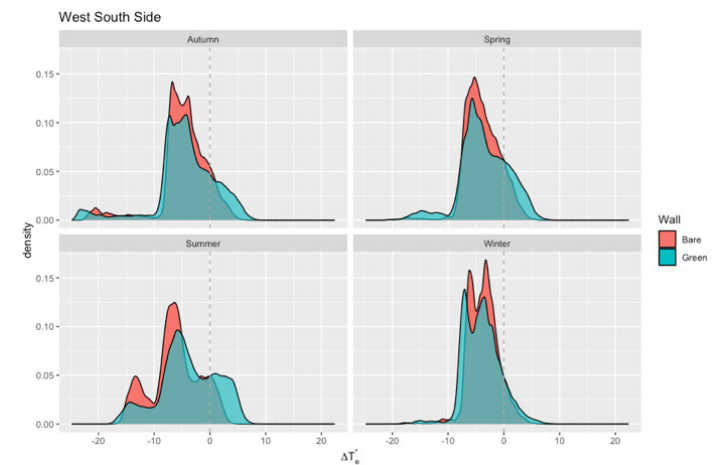


In estate il ΔT tra la temperatura esterna e quella superficiale del sensore posto dove c'è la parete verde è tendenzialmente maggiore rispetto a quella dove c'è.

In inverno è piuttosto frequente che le temperature si eguagliano o che la temperatura superficiale dove non c'è parete verde sia più fredda rispetto a quella dove c'è.

Y: Densità: proporzionale alla frequenza nel corso del triennio con la quale si presenta un certo valore del ΔT .

X: Valore ΔT : espresso in $^{\circ}\text{C}$ è la differenza di temperatura tra quella esterna e quella segnalata dai sensori posti a West (W_B_Wall corrispondente al muro senza green wall e W_G_Wall con green wall).



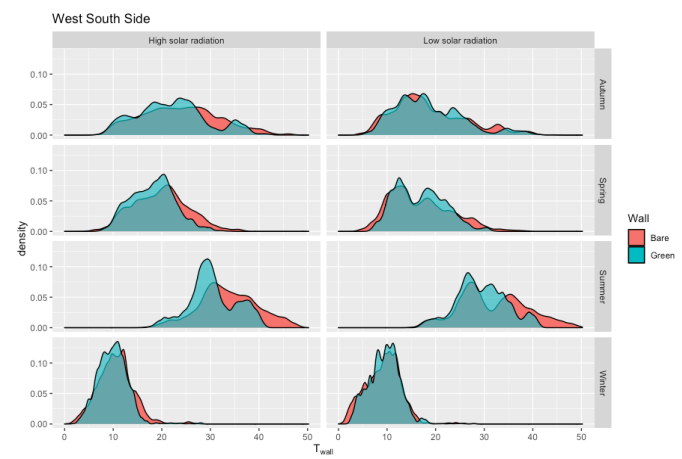
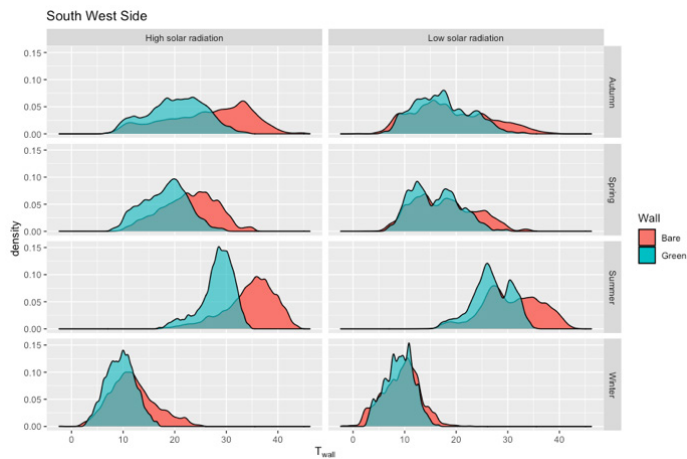
Si verifica un fenomeno simile a South ma meno accentuato in estate.

Grafico 3 Distribuzione T_{Wall} nelle ore diurne in base all'irraggiamento per stagione

*Soglie irraggiamento per la definizione High e Low: autunno 0.4; primavera 0.6; estate 0.7; inverno 0.14.

Y: Densità: proporzionale alla frequenza nel corso del triennio con la quale si presenta un certo valore della temperatura.
X: Valore T_{wall} : espresso in °C è la temperatura segnalata dal sensore posto sul muro a South.

Y: Densità: proporzionale alla frequenza nel corso del triennio con la quale si presenta un certo valore della temperatura.
X: Valore T_{wall} : espresso in °C è la temperatura segnalata dal sensore posto sul muro a West.



L'effetto della parete verde è più evidente nella parete South, in termini di temperature inferiori con irraggiamento più alto in tutte le stagioni ove presente la parete verde.

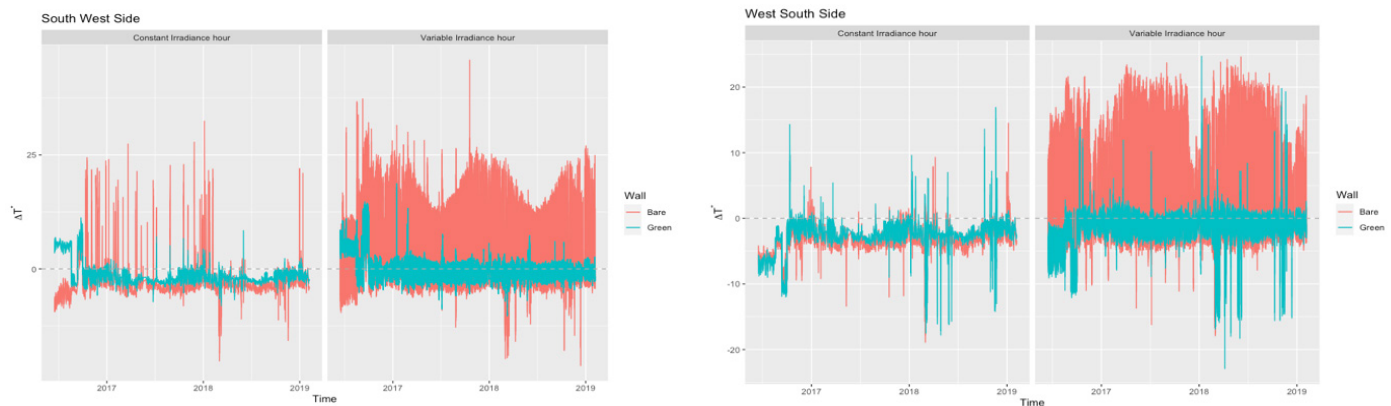
Non risulta alcun effetto particolarmente evidente nella parete West se non una lieve differenza in estate.

Grafico 4 Distribuzione ΔT^* nelle ore diurne in base all'irraggiamento nel triennio

*Valutazione in base alle ore con irraggiamento costante (deviazione standard dell'irraggiamento orario < 0.5) e con irraggiamento variabile (deviazione standard dell'irraggiamento orario ≥ 0.5)

Y: Valore ΔT^* : espresso in $^{\circ}\text{C}$ è la differenza di temperatura segnalata nei sensori posto sull'involucro e sul muro a South.
X: Time.

Y: Valore ΔT^* : espresso in $^{\circ}\text{C}$ è la differenza di temperatura segnalata nei sensori posto sull'involucro e sul muro a West.
X: Time.



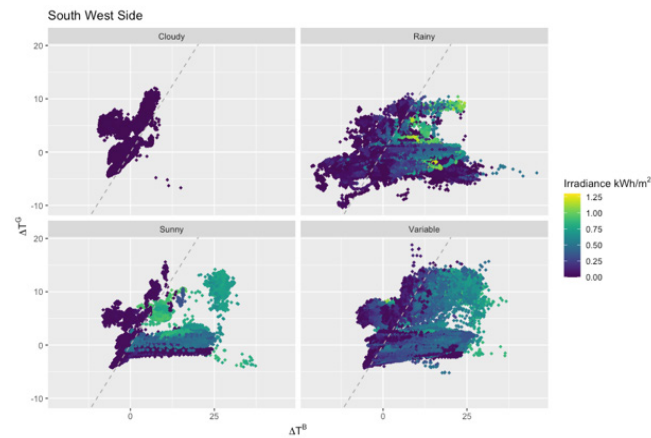
Quando l'irraggiamento è variabile la funzione di mitigazione della parete verde è ancora più apprezzabile: il ΔT^* è piuttosto inferiore (di circa 20°) rispetto a dove la parete verde non c'è. La differenza tra le due tipologie di involucro è apprezzabile anche con irraggiamento costante.

Si determinano le stesse conclusioni espresse per la parete West, aggiungendo che con irraggiamento costante il comportamento di entrambi gli involucri è per lo più simile.

Grafico 5 Distribuzione del ΔT^* per eventi atmosferici, con focus rispetto all'irraggiamento

Y: Valore ΔT^* : espresso in $^{\circ}\text{C}$ è la differenza di temperatura segnalata nei sensori posto sull'involucro e sul muro a south_west dove c'è la parete verde.

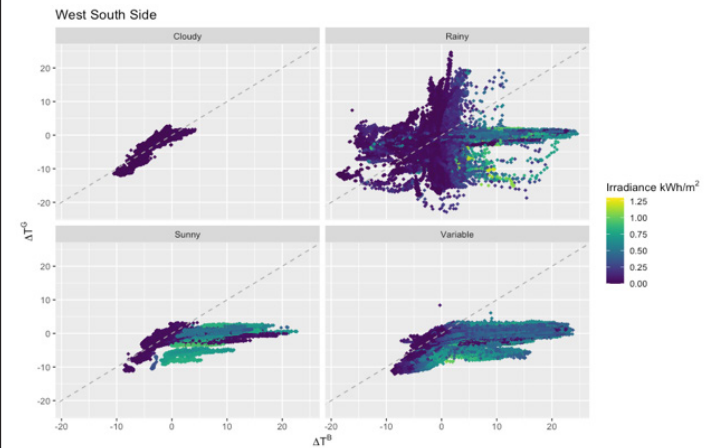
X: Valore ΔT^* : espresso in $^{\circ}\text{C}$ è la differenza di temperatura segnalata nei sensori posto sull'involucro e sul muro a South dove non c'è la parete verde.



Tutti i punti che si discostano dalla bisettrice indicano una variazione delle temperature in base alla presenza/assenza di parete verde. Sia nei giorni soleggiati quando l'irraggiamento aumenta, le temperature della skin dell'involucro con parete verde risultano maggiori rispetto a quelle del muro di circa 0-15 $^{\circ}\text{C}$ con una concentrazione a circa 5 $^{\circ}\text{C}$, mentre quelle della skin in assenza di parete verde raggiungono differenze maggiori di 25 $^{\circ}\text{C}$. Nelle giornate variabili, con irraggiamento alto ci sono diverse situazioni in cui le temperature della skin sono inferiori rispetto a quelle del wall e nel caso di involucro con parete verde il ΔT^* si attesta sempre intorno ai 5 $^{\circ}\text{C}$, nel caso di involucro senza arriva fino a 25 $^{\circ}\text{C}$.

Y: Valore ΔT^* : espresso in $^{\circ}\text{C}$ è la differenza di temperatura segnalata nei sensori posto sull'involucro e sul muro a west_south dove c'è la parete verde.

X: Valore ΔT^* : espresso in $^{\circ}\text{C}$ è la differenza di temperatura segnalata nei sensori posto sull'involucro e sul muro a West dove non c'è la parete verde.

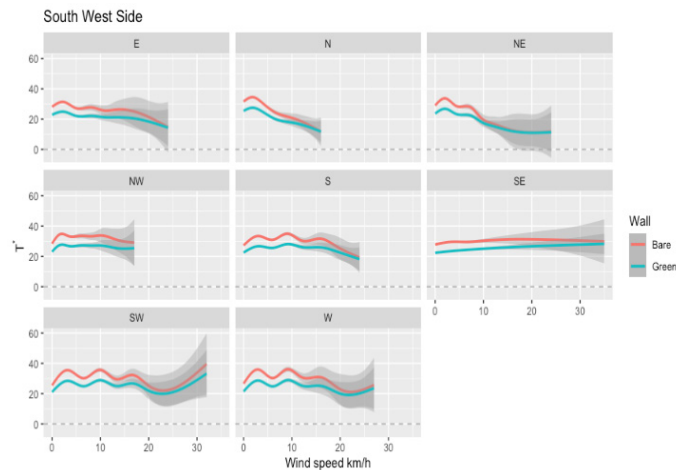


Su questa parete lo scostamento su differenze di temperature positive in assenza di parete verde è ancora più evidente, all'aumentare del valore di irraggiamento.

Grafico 6 Distribuzione T_{wall} rispetto alla direzione del vento

Y: T: espresso in °C è la temperatura segnalata dal sensore posto a south_wall.

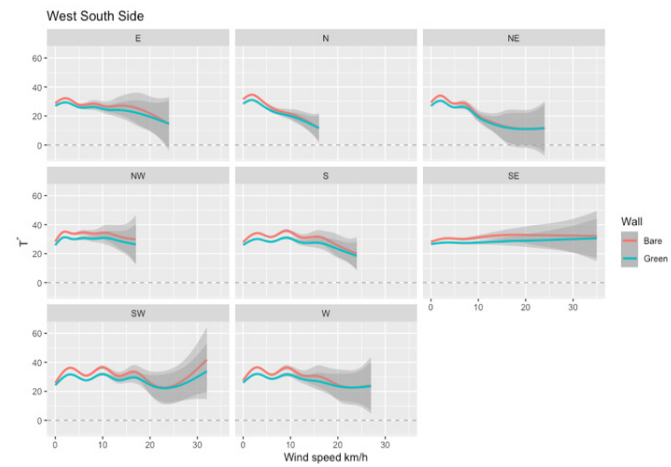
X: Velocità del Vento in Km/h



Di giorno il decremento del valore delle T_{wall} è meno evidente rispetto alla notte, favorito dall'effetto dell'irraggiamento: circa 10°C nel caso di vento da N e NE, circa 5°C a E e 2°C a S; nelle direzioni NW, SE e W la variazione di T è trascurabile; a SW aumenta di circa 10°C. Quando vi è un decremento di T all'aumentare della velocità del vento la $T_{G_{Wall}}$ e $T_{B_{Wall}}$ tendono ad eguagliarsi quindi, anche in questo caso la $T_{B_{Wall}}$ decresce in media di circa 4°C in più rispetto la $T_{G_{Wall}}$. A SW hanno lo stesso andamento.

Y: T: espresso in °C è la temperatura segnalata dal sensore posto a west_wall.

X: Velocità del Vento in Km/h

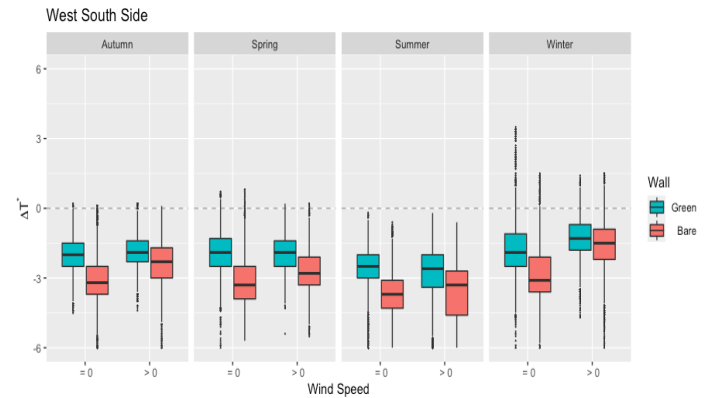
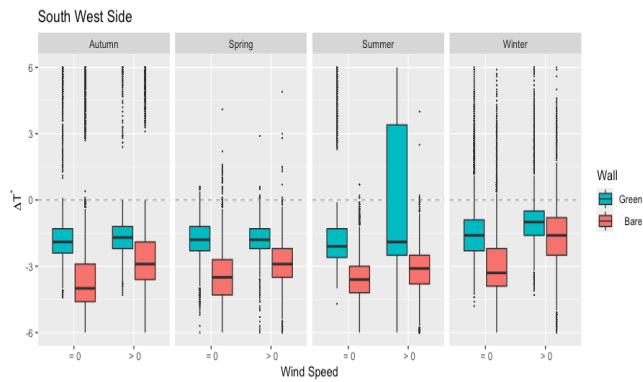


Sul lato ovest la $T_{G_{wall}}$ è inferiore alla $T_{B_{wall}}$ in media di circa 5°C e rimane sempre inferiore fino a velocità di vento maggiori di 25 km/h tranne nel caso di vento perpendicolare alla parete e nel caso di vento freddo proveniente da N. A SW con vento a 39 km/h (vento caldo) la $T_{G_{wall}}$ è inferiore alla $T_{B_{wall}}$ di circa 8°C.

Grafico 7 Distribuzione ΔT rispetto alla presenza del vento per stagione

Y: Valore ΔT : espresso in °C è la differenza di temperatura segnalata dai sensori posti a south_west_skin e south_west_wall.
 X: Assenza di vento = 0 e presenza > 0

Y: Valore ΔT : espresso in °C è la differenza di temperatura segnalata dai sensori posti a west_south_skin e west_south_wall.
 X: Assenza di vento = 0 e presenza > 0



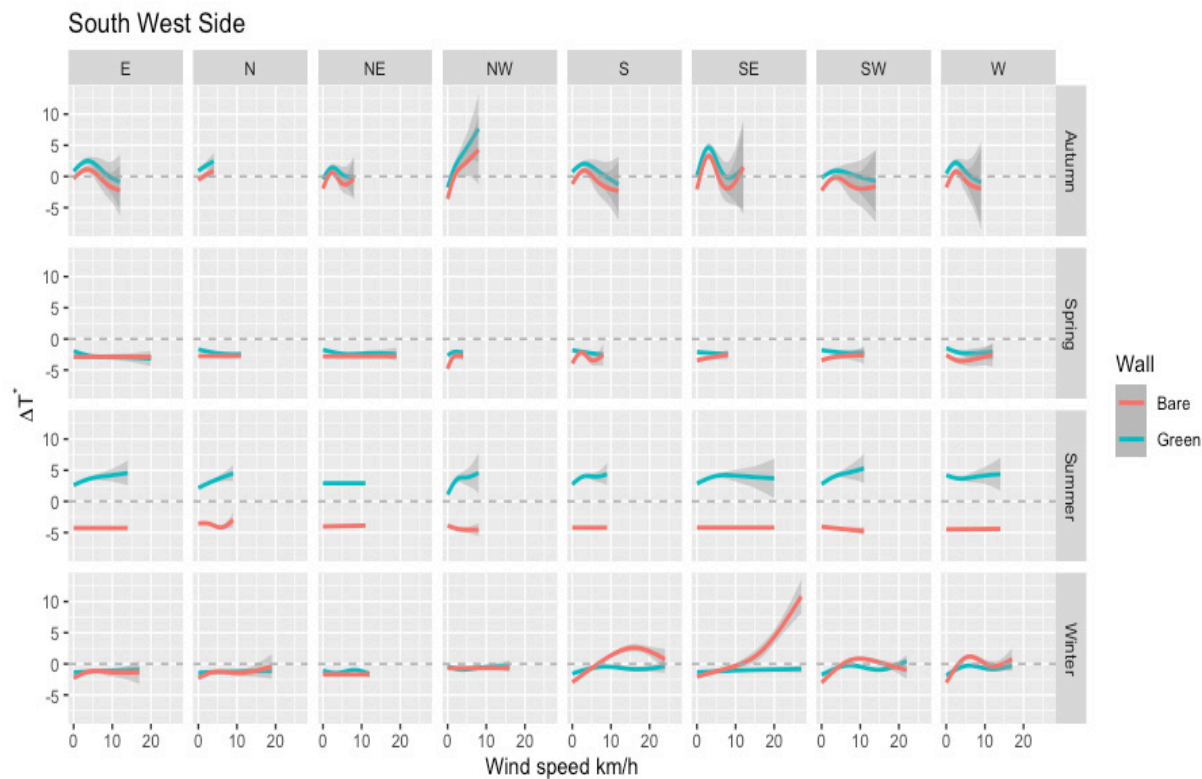
Il ΔT in corrispondenza della parete verde è più vicino allo zero rispetto a dove non c'è. In generale la temperatura nel wall è sempre maggiore rispetto a quella della skin, ma dove non c'è la parete verde lo è ancora di più. In estate e in presenza di vento la parete verde riesce a mitigare dal caldo, poiché la T in skin è maggiore della T in wall.

La situazione è simile a ciò che succede a sud, tranne in estate e con vento dove a sud è evidente l'effetto rinfrescante della parete verde.

Grafico 8 Distribuzione ΔT^* rispetto alla velocità e direzione del vento per stagione

Y: Valore ΔT^* : espresso in °C è la differenza di temperatura segnalata dai sensori posti a south_west_skin e south_west_wall.

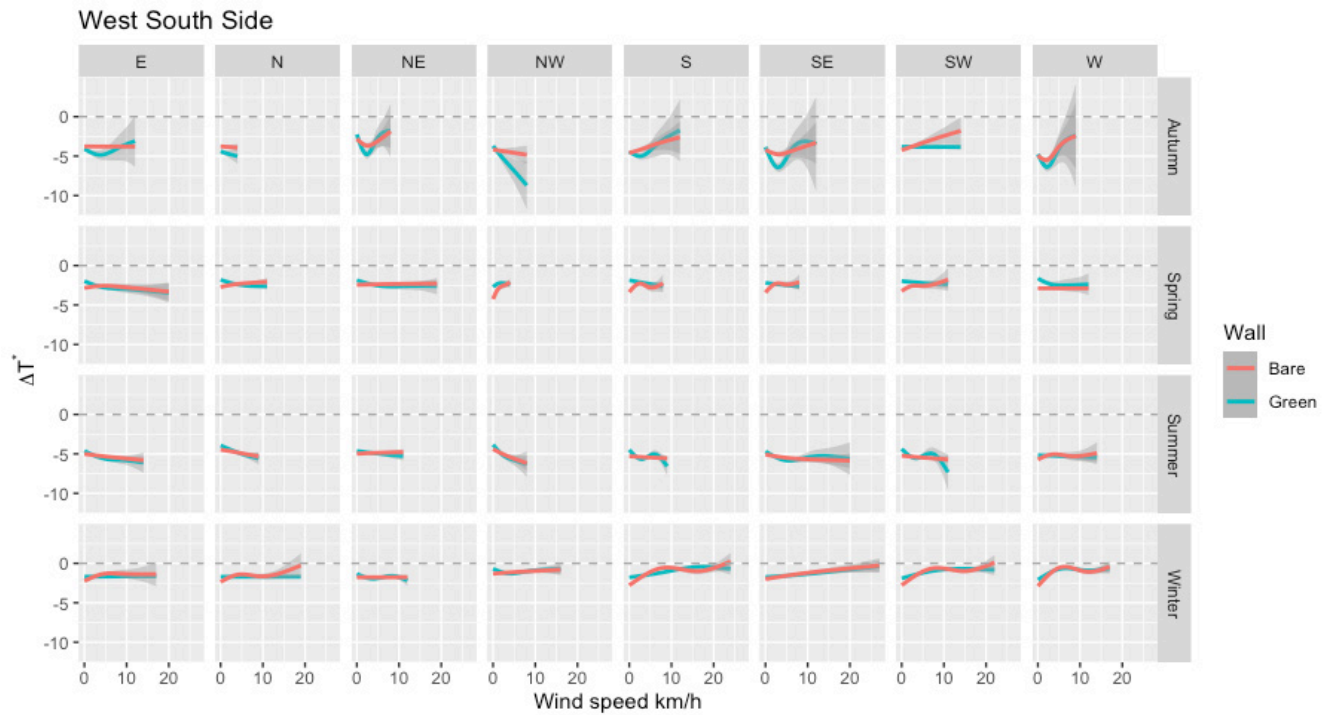
X: Velocità del vento in Km/h



Gli effetti della parete verde sono maggiormente apprezzabili sulla parete esposta a sud. In corrispondenza della parete verde in inverno il wall è sempre più caldo della skin; in estate il wall è più freddo della skin ed è netta la differenza rispetto a dove non c'è parete verde. Il vento non influisce su questo. In inverno, la parete verde ha un ΔT^* sempre prossimo allo 0 rispetto a quella dove non c'è, in particolare con vento crescente da sud.

Grafico 9 Distribuzione ΔT^* rispetto alla velocità e direzione del vento per stagione

Y: Valore ΔT^* : espresso in °C è la differenza di temperatura segnalata dai sensori posti a south_west_skin e south_west_wall.
 X: Velocità del vento in Km/h



In generale il wall è sempre più caldo della skin. Il comportamento della parete verde è sempre lineare e con ΔT^* prossimo allo 0, tranne in autunno con vento che soffia da nord-ovest in corrispondenza della parete verde aumenta la temperatura del wall rispetto la skin ed è positivo se si considera che si tratta di un vento freddo.

3. Risultati

L'elaborazione condotta restituisce un quadro del comportamento complessivo nel triennio, per stagione, per entrambe le esposizioni sud e ovest e per entrambe le tipologie di involucro edilizio. In una prima parte, i dati mostrano il comportamento generale dell'involucro edilizio con green wall rispetto a quello senza, analizzando le temperature superficiali in corrispondenza del muro e le differenze di temperatura tra la pelle e il muro, anche al variare della temperatura esterna. Per distinguere la reazione della parete a condizioni meteo svantaggiose sono definite delle soglie di irraggiamento, vento e pioggia elevati.

Analisi 1 - Condizioni generali

I risultati confermano la capacità coibente della parete verde restituendo una differenza di temperatura tra il muro semplice e il muro coperto dalla green wall di circa 2°C in inverno. In estate la parete verde riesce ininterrottamente a raffrescare il muro mostrando una differenza di temperatura fino a circa 13°C rispetto all'involucro sprovvisto. Il fenomeno è simile in entrambe le esposizioni sud e ovest, ma a ovest in estate è meno accentuato e in inverno l'effetto coibente è più costante. Inoltre, dall'analisi complessiva del triennio è evidente che dove non c'è la parete verde l'escursione termica tra la pelle dell'involucro e il paramento murario è notevole e raggiunge i 25°C, dove c'è la parete verde la differenza massima è di circa 3°C. Rispetto alla temperatura esterna, il contributo della parete verde è apprezzabile soprattutto in estate e più a

sud che a ovest, riuscendo a raffrescare il muro a sud fino a circa 10°C e a ovest fino a circa 7°C.

Analisi 2 – Focus sull'effetto dell'irraggiamento

In condizioni di livelli più elevati di irraggiamento in autunno e primavera (irraggiamento ≥ 0.4 e ≥ 0.6 KW/m² rispettivamente), il raffrescamento dell'involucro con parete verde in risposta all'elevato irraggiamento si apprezza per lo più a sud. In estate, la parete verde è più prestante (rispetto a soglie di irraggiamento ≥ 0.7 KW/m²), mitigando la temperatura del muro di circa 10°C sia a sud che a ovest, ciò significa che sarebbe piuttosto efficace in climi tropicali. La tesi è confermata soprattutto quando si esamina l'escursione termica tra la pelle e il muro in quanto, dove è presente la parete verde è quasi nulla poiché le piante riescono ad assorbire radiazioni solari notevoli, contrariamente al comportamento della pelle priva di parete verde che si surriscalda di 25°C in più a ovest e a sud persino oltre i 30°C.

Analisi 3 – Focus sull'effetto della pioggia

La stagione maggiormente piovosa è la primavera. Flussi di pioggia fino a 100 mm/h non sembrano influenzare il comportamento della parete verde a sud, che riesce a mantenere un'inerzia tale da non destabilizzare il ΔT^G , sempre prossimo allo zero, a differenza invece dell'involucro senza parete verde che subisce molto l'influenza della pioggia e ciò è visibile dall'incremento dell'escursione termica tra la skin e il

wall in sfavore di comfort termico (in estate incremento e in inverno diminuzione di T_{wall}). Tale comportamento invece non è apprezzabile a ovest, in quanto non sembra esserci relazione tra temperature e aumento del flusso piovoso. C'è comunque una nota a favore della parete verde in primavera, stagione più piovosa, dove la T_{wall} è sempre maggiore della T_{skin} .

Analisi 4 – Focus sull'effetto del vento

La capacità di barriera al vento della parete verde è apprezzabile più per la parete orientata a sud che a ovest, dove all'aumentare del vento il ΔT^* aumenta in corrispondenza del paramento senza parete verde (es. da -2°C a $+8^\circ\text{C}$ a sud-est) e diminuisce dove è invece presente (es. da $+2^\circ\text{C}$ a -2°C a sud-est); a ovest all'aumentare del vento (>15 km/h) aumenta la T_{B_Skin} in maniera leggermente maggiore rispetto T_{G_Skin} (di circa 2°C) ma si mantiene sempre più bassa rispetto a quella del wall. A sud, nel caso di venti freddi (in particolare direzioni nord e nord-est) a circa 18 Km/h la T_{G_Wall} si raffredda di circa 14°C a fronte della T_{B_Wall} che si raffredda di circa 19°C e, dunque, la parete verde apporta un effetto coibente di circa 5°C . Conoscendo le T_{wall} , dall'andamento della ΔT^* si determina che la T_{G_Skin} si raffredda di circa 12°C e la T_{B_Skin} di 19°C come la T_{B_Wall} . A sud anche in presenza di venti caldi, con velocità di 25 Km/h, le T diminuiscono, questo poiché si tratta di un'analisi media dell'anno in ore notturne, durante le quali è più frequente una T_e fredda (l'analisi stagionale è stata effettuata considerando le 24h giornaliere). Sul lato ovest le due tipologie di

pareti, specificatamente nelle ore notturne e quindi senza irraggiamento le T_{wall} delle due differenti tipologie di involucro si eguagliano, indipendentemente dalla velocità del vento.

Analisi 5 – Focus sull'effetto del vento con irraggiamento

L'influenza dell'irraggiamento è sostanziale nell'andamento delle T_{wall} in funzione della velocità del vento: il decremento del valore delle T_{wall} è circa 10°C nel caso di vento freddo da N e NE, circa 5°C a E e 2°C a S a SW aumenta di circa 10°C . A sud la T_{B_Wall} decresce in media di circa 4°C in più rispetto la T_{G_Wall} , a SW con vento a 39 km/h (vento caldo) la T_{G_Wall} è inferiore alla T_{B_Wall} di circa 8°C . Sul lato ovest la T_{G_Wall} è inferiore alla T_{B_Wall} in media di circa 5°C e rimane sempre inferiore tranne nel caso di vento perpendicolare alla parete, proveniente per l'appunto da W, e nel caso di vento freddo, da N, con velocità del vento maggiore di 25 km/h. Il vento non sembra influenzare le prestazioni della parete verde né a sud né a ovest; la presenza del vento nell'involucro dove non c'è la parete verde tende a fare avvicinare allo zero il ΔT^* poiché la temperatura del muro diminuisce, in particolar modo in inverno (diminuisce di circa 3°C). All'aumentare della velocità del vento le prestazioni della parete verde sono mantenute: a sud dove non c'è la parete verde in estate la T_{B_Wall} aumenta di circa 2°C all'aumentare del vento e in inverno con vento che soffia da SE la T_{B_Wall} risente del vento e con velocità a 30 Km/h si raffredda di circa 4°C e il ΔT^B aumenta di oltre 10°C . La T_{G_Wall} invece rimane sempre stabile anche in autunno dove si

registra una diminuzione della T_{G_Skin} di circa 7°C con vento proveniente da nord-ovest e con velocità di 10 Kmh .

Analisi 6 – Focus sull'effetto combinato vento-pioggia

L'efficacia dell'effetto coibente della parete verde all'aumentare delle precipitazioni si percepisce a sud ed in presenza di tutti i tipi di vento, ed in particolar modo in presenza di vento moderato e a ovest in presenza di vento leggero. A sud il ΔT^G con pioggia fino a e vento leggero diminuisce da -1° a -4°C , con vento moderato da -1°C a -2°C ; comportamento opposto rispetto all'involucro bare dove il con vento leggero diminuisce da 0°C a -8°C e con vento moderato da 1°C a -12°C . A ovest con flusso piovoso di circa 60 mm/h con vento leggero il ΔT^B è minore rispetto a ΔT^G di circa 10°C e di circa 5°C con vento moderato. In linea con le altre analisi, sempre ad ovest il ΔT^G in generale è leggermente inferiore al ΔT^B , ma in assenza di vento l'andamento oscillante del grafico non mostra una correlazione tra il ΔT e aumento del flusso piovoso.

4. Conclusioni

I risultati confermano l'efficacia della parete verde, restituendo una migliore risposta alla T_e in tutte le stagioni sia a sud che a ovest. Raffrescando in estate la parete sud di circa 10°C e di circa 7°C a ovest e coibentando l'involucro in inverno fino ad ottenere una T_{G_Wall} superiore alla T_e di circa 9°C , sia a sud che a ovest. La

differenza tra le due tipologie di involucro si apprezza soprattutto d'estate, dove si ha una T_{G_Wall} inferiore rispetto alla T_{B_Wall} di circa 7°C a sud e di circa 4°C a ovest; in inverno è dimostrata un'azione isolante con una T_{G_Wall} di circa 2°C in più rispetto alla T_{B_Wall} sia a sud che a ovest. Questi dati mostrano la validità del sistema per contenere il fabbisogno energetico, soprattutto considerando il previsto incremento delle temperature medie globali tra il 2021 e il 2040 compreso fra 1 e 2.5°C [11], impattando positivamente sulla stagione invernale, ma provocando un rapido surriscaldamento durante la stagione estiva nelle località più calde. Per la latitudine sud-europea la schermatura a sud è ideale, poiché è quella con il più elevato numero di ore di esposizione all'irraggiamento solare; in estate la radiazione solare colpisce la parete con una angolazione tale da non intercettare eventuali aggetti orizzontali [12].

I dati dell'analisi mostrano come sia anche valida la schermatura a ovest ancor più nella condizione di elevato irraggiamento, per la quale la parete verde migliora le sue prestazioni, raffrescando in estate il muro fino a 10°C in meno rispetto al bare wall e 3°C in meno rispetto alle comuni condizioni.

Considerando il flusso piovoso e l'effetto combinato pioggia-irraggiamento vi è una risposta diversa in funzione dell'esposizione della parete: a sud i flussi di pioggia elevati non influenzano le prestazioni della green wall, a differenza invece della skin bare, la cui temperatura superficiale varia determinando in estate un incremento e in inverno una diminuzione della T_{B_Wall} ; a ovest è simile il comportamento di entrambe le tipo-

logie di involucro e non è proporzionale all'aumentare del flusso piovoso. Per indagare quest'ultima situazione è in corso una ulteriore analisi sull'influenza dei venti dominanti e l'effetto combinato con il flusso piovoso. L'effetto combinato pioggia-irraggiamento mostra soltanto a sud una capacità di raffrescamento continua e un'escursione termica contenuta tra la skin e il wall anche durante piogge superiori ai 100 mm/h e irraggiamento da 0.5 a 1 KWh/m².

La parete verde risponde bene in presenza di pioggia e vento poiché in inverno la TG_Wall è maggiore della TG_Skin e in estate è al contrario. Dalle analisi eseguite deriva, infatti, che l'effettiva capacità di barriera al vento della parete verde è apprezzabile in entrambe le pareti, ma maggiormente a sud: nel momento in cui si considera l'irraggiamento è più marcata la differenza tra gli orientamenti mostrando in estate una maggiore capacità di raffrescamento del muro rispetto a ovest di circa 4°C. Questo probabilmente poiché la parete sud riceve soprattutto in estate una quantità di calore derivante dal soleggiamento della parete durante più ore della giornata e in maniera più incidente e il vento, in particolare quello caldo, amplifica il fenomeno surriscaldando eccessivamente l'involucro sprovvisto da parete verde.

Ad ovest nelle ore notturne le T_{wall} delle due differenti tipologie di involucro si eguagliano, questo poiché, ricordando che invece durante le ore diurne la parete verde effettua in media nell'arco dell'anno una capacità rinfrescate e quindi che la T_{wallB} è maggiore della T_{wallG}, probabilmente accade che durante tale fascia oraria notturna l'involucro bare non mantiene

costante la T_{wall}, diminuendo. Si è notato, inoltre, che la precipitazione influisce sul rendimento dell'involucro con parete verde quando il vento soffia perpendicolarmente alla parete in entrambi gli orientamenti sud e ovest, con una conseguente leggera diminuzione della TG_Wall (1-2°C). Si ricorda, infine, che in tale caso studiato l'edificio si trova in un luogo la cui morfologia non influisce all'intensificazione né allo smorzamento delle condizioni meteorologiche.

Note

La ricerca è stata finanziata dal Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca (MIUR) PON "Ricerca e Innovazione 2014-2020" Sezione 1 "Mobilità dei ricercatori" con D.D. 407 of 27/02/2018 co-finanziato dal Fondo Sociale Europeo-CUP B74I19000650001-id AIM 1890405-3, area: "Tecnologie per gli ambienti di vita". La ricerca si è svolta nell'ambito della collaborazione con il Dipartimento di Costruzioni e Tecnologia in Architettura dell'Università Politecnica di Madrid (DCTA/UPM), nella persona della Prof. Arch. F. Olivieri, all'interno del Protocollo per la cooperazione di ricerca nei settori della Progettazione Ambientale, della Tecnologia dell'architettura e della Progettazione architettonica sostenibile (Responsabile Prof. Arch. M. L. Germanà), siglato tra il DARCH/UNIPA e il DCTA/UPM.

Si ringraziano la Ricercatrice Giulia Marcon e il Professore Marcello Chiodi afferenti al Dipartimento di Scienze Economiche, Aziendali e Statistiche (DSEAS) dell'Università degli Studi di Palermo per l'ausilio all'elaborazione dati e dei grafici mediante il software R.

Si ringrazia l'Istituto itdUPM <https://www.itd.upm.es/> e il laboratorio di Robotica Robolabo <http://www.ro->

bolabo.etsit.upm.es/ per aver fornito i dati del sistema di monitoraggio; il Prof. Lorenzo Olivieri che ha contribuito nella parte sensoristica

Parte della ricerca è in corso di pubblicazione in Nicolini E., Germanà M. L., Marcon G., Marcello C., Gu-

tiérrez A., Olivieri F. (2022), Monitoring of the effect of rain and solar radiation on the building envelope with integrated vertical vegetation, in *Building and Environment* - ISSN 0360-1323.

Bibliografia

1. Pérez G., Rincón L., Vila A., González J. M., Cabeza L. F., *Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings*, Applied Energy, Volume 88, Issue 12, **2011**, pp. 4854-4859.
2. Perini K., Ottelé M., Fraaij A.L.A., Haas E.M., Raiteri R., *Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope*, Building and Environment 46, Issue 11, **2011**, pp. 2287-2294
3. Šuklje, T., Medved, S., Arkar, C. An Experimental Study on a Microclimatic Layer of a Bionic Façade Inspired by Vertical Greenery. J Bionic Eng 10, **2013**, pp. 177-185.
4. Shrestha, A., Shimizu, T., Evaluation of the suppressive effects on solar radiation for a building façade covered with green layers in the Kathmandu valley. Environmental Challenges 5, **2021**.
5. Giordano, R., Montacchini, E., Tedesco, S., Perone, A., *Living wall systems: a technical standard proposa*, in Energy Procedia, 111, **2017**, pp- 298-307.
6. Herath, H., Halwatura, R. U., Jayasinghe, G. Y., *Evaluation of green infrastructure effects on tropical Sri Lankan urban context as an urban heat island adaptation strategy*. Urban Forestry & Urban Greening,29, **2018**, pp. 212-222.
7. Pérez, G., Coma, J., Sol, S., Cabeza, L. F., Green facade for energy savings in buildings: The influence of leaf area index and facade orientation on the shadow effect. Applied energy 187, **2017**, pp. 424-437.
8. Sendra-Arranz, R., Oquendo, V., Olivieri, L., Olivieri, F., Bedoya, C., Gutiérrez, A., *Monitorization and statistical analysis of south and west green walls in a retrofitted building in Madrid*. Building and Environment 183, **2020**.
9. Olivieri, F., Redondas, D., Olivieri, L., Neila, J., *Experimental characterization, and implementation of an integrated autoregressive model to predict the thermal performance of vegetal façades*. Energy and buildings 72, **2014**, pp. 309-321.
10. R Core Team, *R: A language and environment for statistical computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, **2021**.
11. Stanganelli, M., Gerundo C., *L'adattamento delle città ai cambiamenti climatici*, FedOA-Federico II University Press, **2018**.
12. Chiesa, G., Von Hardenberg, J., *Including climate change time-dimensions in bioclimatic design*, in TECHNE-Journal of Technology for Architecture and Environment, **2020**, pp. 204-212.

Il cocciopesto per il miglioramento microclimatico negli edifici residenziali: il monitoraggio del caso studio in Pianura Padana

Maria Rosso¹, Sofia Agostinelli²

1 PhD, collab. esterno presso il Dipartimento di Pianificazione, design, tecnologia dell'architettura, Università "La Sapienza" di Roma, Italia

2 Ricercatrice presso il Dipartimento di Pianificazione, design, tecnologia dell'architettura, Università "La Sapienza" di Roma, Italia

In the current international overview that puts the focus on our built in full respect of natural resources, aimed at improving our quality of life, it is necessary to review and understand how the techniques of the past are still very useful today to improve our quality of life. Studying the past to live the present and setting the future is a known thing but demonstrating the application of ancient

techniques on contemporary buildings is less so. This is an example of how, an ancient technique such as the use of "cocciopesto" is still effective today to improve the response of existing wall structures to the problem of the internal health of the rooms and their conservation in relation to the reduction of energy consumption.

1. Introduzione

Pubblicato nel 2019 sulla rivista Ponte [1], il caso studio dell'applicazione del "Cocciopesto" trova ancora oggi una meritevole finestra visiva attraverso il monitoraggio dello stato attuale, volto a sottolineare l'importanza di comprendere, come le tecniche del passato, siano in grado di dare un considerevole contributo al nostro benessere abitativo.

Dall'Enciclopedia Treccani il termine di Cocciopesto è così citato: "COCCIOPESTO (lat. *opus signinum*). - Genere di pavimentazione e di rivestimento delle pareti usato dagli antichi per proteggere i muri dall'umidità: il cocciopesto era costituito da una miscela compatta di frammenti di materiale fitile, generalmente ricavato da rottami di tegole e di anfore, unito con calce grassa; (...) ebbe poi una grande applicazione durante l'Impero negli edifici termali".

La dicitura di "Cocciopesto" raccoglie ancora oggi il significato e l'utilizzo che gli antichi avevano scoperto attraverso sperimentazioni che rappresentano, per la nostra civiltà, esempi virtuosi di architetture e di tecniche costruttive. L'origine del cocciopesto è forse ancora più antica del primo trattato di Vitruvio, che ne ha tradotto in forma scritta la tecnica di realizzazione e gli scopi del suo impiego. Il trattato non ci è pervenuto nella sua trascrizione originaria ma, sotto forma di numerosi manoscritti (codici) conservati in molte biblioteche europee. Al 1486 risale l'*editio princeps*, la prima edizione a stampa del *De Architectura* (...). Da allora il testo vitruviano ha incontrato una straordi-

na fortuna editoriale, potendo contare da allora quasi 200 edizioni [2].

I recenti studi hanno altresì mostrato come la lingua del *De Architectura*, "capace di muoversi fra le categorie teoriche e gli esempi pratici, di esprimere concetti astratti e indicazioni concrete, contenga le premesse per il linguaggio dell'architettura moderna." [3].

L'influenza di Vitruvio si estenderà fino in età rinascimentale. La sua opera diviene un autentico modello per i trattatisti dell'epoca, che facendo proprie le indicazioni di Vitruvio, rimarcano e confermano la funzione del rivestimento come protezione e finitura delle strutture murarie.

Uno dei trattatisti dell'epoca è Leon Battista Alberti che, intorno al 1450 scrive il *De re ædificatoria* (letteralmente "Sull'edilizia"). È un trattato in dieci libri sull'architettura scritto in latino e rivolto, non solo ad un pubblico specialistico ma, anche al pubblico colto di formazione umanistica. Fu scritto sul modello dei dieci libri del trattato *De architectura* di Vitruvio (80 a.C. - 15 a.C.), circolante in copie manoscritte, non ancora rivedute filologicamente e non tradotto in volgare. L'Alberti riprende i tre concetti fondamentali della sua teoria: *firmitas* (solidità), *utilitas* (destinazione d'uso, funzione) e *venustas* (bellezza) e suggerisce di realizzare l'intonaco almeno in tre strati.

Il primo, chiamato ancora oggi "rinzafo", doveva essere realizzato con calce, sabbia e cocci di mattone (in un rapporto di 1:2:1) con il compito di aderire al supporto e sostenere gli strati successivi. Il secondo, chiamato "arriccio" realizzato con calce e sabbia di fiume (in un rapporto di 1:2) ed avere la funzione di livella-

mento oltre ad avere “l’incombenza di porre riparo ai difetti dell’uno e dell’altro”. Al terzo, invece, viene affidata una funzione prevalentemente di tipo estetico. Realizzato in calce e polvere di marmo finissima (in un rapporto di 1:2), il “polimento”, o strato di finitura, scriveva L.B. Alberti “ha la funzione di dispiegare le attrattive delle decorazioni, dei colori e delle linee” [4]. Oltre a L.B. Alberti, si rifanno a Vitruvio, Palladio, Scamozzi e Zannini.

Tra la metà del Settecento e l’avvento del cemento con il periodo dell’industrializzazione ottocentesca, si assiste ad un progressivo abbandono delle tecniche “antiche”. Le molteplici cause, forse legate anche ad una più difficile possibilità di reperimento delle materie prime, spingono ad una graduale necessità di accelerazione temporale nella realizzazione di opere murarie. Anche il numero degli “strati” del rivestimento murario, viene notevolmente ridotto tanto che, Francesco Milizia, ricordando i numerosi strati dell’intonaco Vitruviano, lamentava “... ci contentiamo di un solo strato di arena su cui spianiamo subito un’incrostatura marmorea. Qual meraviglia se i nostri riescono informi e fragili”. [5].

La conseguente costante ricerca di nuovi leganti spinge pertanto, al superamento della vecchia manualistica portando l’attenzione per i “nuovi materiali” che registrano un crescente apprezzamento, sia per la facilità, sia per la rapidità d’impiego. Questi nuovi materiali, di cui ancora oggi ne disponiamo un ampio ventaglio, hanno la peculiarità di garantire ridotti tempi di presa rispettando allo stesso tempo, le caratteristiche tecniche del rivestimento (si presume):

il cemento ne è l’esempio più emblematico. Da questo punto in poi, nella storia costruttiva, materiali e tecniche sono stati pertanto, basati prevalentemente, più sulla necessità di una rapida esecuzione che sulla volontà di realizzare manufatti durevoli. Negli ultimi anni però, anche alla luce della crisi che ha coinvolto il settore, la durabilità delle opere, o meglio, la conservazione delle strutture murarie, non solo di Beni Architettonici di grande valore storico, ha acquistato sempre più un ruolo centrale del processo costruttivo. L’attenzione per la tutela del nostro “Patrimonio Costruito” anche paesaggistico, ha attivato una politica, non solo italiana ma anche europea, di conservazione e di riqualificazione di tutto ciò che è stato edificato, limitando a determinati settori, strettamente vagliati, le nuove realizzazioni.

La politica di salvaguardia innesca inevitabilmente un processo di rivisitazione del nostro passato, non solo per preservarlo come fonte di cultura per le nostre generazioni future, ma come fonte di studio e di sperimentazione di tecniche che hanno portato fino a noi, esempi virtuosi di architetture “salutari” per il nostro benessere di vita.

Ed è in quest’ottica che si sta assistendo ad una rivalutazione del rivestimento, non solo come elemento decorativo e di abbellimento delle facciate, ma anche quale presidio contro l’azione aggressiva degli agenti atmosferici e di miglioramento della qualità degli ambienti interni.

Questa rivalutazione sta avvenendo attraverso una riscoperta, in chiave moderna, dei rivestimenti del passato, partendo dall’analisi e dalla valutazione di prodotti, che, forse, non

corrispondono completamente, per caratteristiche tecniche e fisiche, agli usi che ne sono stati fatti fino ad oggi.

2. Caratteristiche delle malte

La matrice delle malte di cemento è di fatto caratterizzata dall'assenza di quelle porosità che, invece, costituivano la caratteristica peculiare della microstruttura degli antichi intonaci a calce e pozzolana [6]. La ridotta porosità della matrice degli intonaci a base di cemento, hanno garantito resistenze meccaniche a compressione maggiori di quelle conseguibili con le tradizionali stabiliture a base di calce, calce-pozzolana o calce idraulica o cocciopesto.

Il problema, è che, a questa maggiore "solidità" degli intonaci di cemento, tuttavia, si associa una rigidità nettamente più elevata: il modulo elastico delle malte cementizie, infatti, può risultare, a seconda della composizione degli impasti, notevolmente maggiore di quello di una malta a base di leganti tradizionali. A causa di questa elevata rigidità gli intonaci di cemento aumentano, generando tensioni di trazione elevate, tutte le contrazioni di natura termo-igrometrica, conducendo alla fessurazione e nei casi più gravi al distacco del rivestimento dalla parete.

Al contrario, le malte di calce, calce e pozzolana o calce idraulica, grazie alle numerose cavità (microbolle) disseminate nella matrice sono caratterizzate da una bassa rigidità e da un modulo elastico decisamente ridotto. Pertanto, le contrazioni dimensionali prodotte da

fenomeni di origine termo-igrometrica producono modesti valori dello sforzo di trazione che non sono in grado di fessurare o distaccare l'intonaco dal supporto cui aderisce.

La presenza delle microbolle nella matrice di queste malte consente inoltre, di attenuare le pressioni indotte dal fenomeno della cristallizzazione dei sali evitando così la formazione di tensioni strutturali capaci, nei casi più gravi di disgregare completamente l'intonaco.

Perché si manifesti la cristallizzazione dei sali è necessario che l'umidità relativa di un determinato ambiente risulti inferiore ad un valore limite funzione della natura del sale e della temperatura. È molto facile, infatti, che l'U.R. dell'ambiente scenda al di sotto di questi valori determinando la cristallizzazione del sale.

In condizioni di bassa ventilazione il fenomeno di cristallizzazione si verifica generalmente sulla superficie esterna con la comparsa di efflorescenze che principalmente deturpano l'estetica del rivestimento. In presenza di forti ventilazioni, invece, i sali possono cristallizzare nei pori situati su piani più o meno distanti dalla superficie determinando, a seguito della formazione di cristalli, forti degradi con esfoliazioni e distacchi della stabilitura [7]. L'utilizzo di malte definite macroporose ha pertanto la caratteristica, grazie a questo sistema di macrobolle di fungere da "vaso di espansione" capace di ospitare gli aumenti di volume a seguito della cristallizzazione dei Sali, senza generare tensioni dirompenti per la matrice legante. La struttura porosa consente inoltre all'intonaco, di smaltire efficacemente l'eventuale umidità presente nella muratura, grazie

alla ventilazione naturale a cui sono sottoposte le murature esterne, e a quella meccanica, se necessaria, nella parte interna delle stesse.

Il processo di smaltimento del vapor acqueo, accumulato nelle murature rivestite con un intonaco macroporoso, come il cocchiopesto, avviene pertanto in modo naturale, permettendo all'aria di azionare un sistema di eliminazione dell'acqua rispettando i tempi normali di evaporazione. L'errata concezione di applicare film protettivi sulle murature, atti a garantire la riduzione dell'assorbimento dell'acqua nelle stesse, altro non fa che impedire la fuoriuscita dell'umidità interna. Inoltre, laddove la superficie è esposta all'irraggiamento solare, il riscaldamento del vapore rimasto intrappolato al di sotto del rivestimento, provoca le cosiddette "sbollature" e nei casi più gravi, il distacco della pellicola superficiale protettiva [8]. L'attuale attenzione di alcune moderne aziende, sensibili a questa nuova consapevolezza, hanno prodotto intonaci macroporosi che riproducono, in chiave moderna, utilizzando materiali e tecnologie attualmente disponibili, la struttura degli intonaci antichi a base di calce e pozzolana, calce e cocchiopesto e calce idraulica. In particolare, nei moderni intonaci, l'aggiunta di "aeranti" consente di ottenere una microstruttura in cui sono disseminate una serie di cavità capaci di garantire compatibilità elasto-meccanica con la muratura; ospitare, senza generare tensioni distruttive, l'aumento di volume connesso con il fenomeno di cristallizzazione dei sali; smaltire l'umidità di risalita dalle fondazioni.

La presente comunicazione è volta proprio ad attestare uno di questi prodotti "moderni"

che hanno, grazie a ricerca e costante sperimentazione, riprodotto i materiali "antichi" con le tecniche odierne.

3. La sperimentazione

L'edificio oggetto della sperimentazione è ubicato nella pianura padana, in prossimità del letto del fiume Po', dove il tasso di umidità dell'aria è oltre il 60% e le condizioni climatiche presentano forti escursioni termiche tra estate ed inverno.

L'edificio è stato realizzato negli anni 60'. La sua configurazione compositiva è a pianta quadrata (10ml x 10ml) e si sviluppa in altezza per due piani fuori terra. La struttura portante è perimetrale, intelaiata con due controventature interne trasversali che inglobano il corpo scala. A causa di un ampliamento nella zona sud, la tessitura muraria è diversificata, e vede, la parte originale realizzata in mattoni pieni, e la parte "nuova" in mattoni forati. Tutto l'edificio è rivestito di un intonaco a cemento dallo spessore di circa 1.5 cm e tinteggiato in esterno con tempero idrorepellenti. È stato possibile constatare che lo stato di conservazione dell'edificio presenta in esterno diverse fessurazioni dell'intonaco (sbollature - lacune) (Figura 1) e umidità di risalita per tutto il tratto perimetrale esterno fino all'altezza di circa di 80 cm dal piano di calpestio (Figura 2).

Internamente, tutte le murature al piano terra presentano evidenti livelli di umidità di risalita, sbollature dell'intonaco (Figura 3a, 3b) e deficitarie condizioni di salubrità degli am-



Fig. 1 Particolare della parete perimetrale. Dalla lacuna dell'intonaco è visibile la malta cementizia.

Fonte: Immagine dell'autrice Rosso M.

Fig. 2 Particolare della parete perimetrale. È possibile identificare il livello di umidità di risalita e le esfoliazioni della membrana idrorepellente usata.

Fonte: Immagine dell'autrice Rosso M.

Fig. 3a Particolare della parete interna - sbollatura dell'intonaco non traspirante, causata dalla presenza di umidità di risalita.

Fonte: Immagine dell'autrice Rosso M.

Fig. 3b Particolare della parete interna - sfarinamento dell'intonaco non traspirante, causata dalla presenza di umidità di risalita.

Fonte: Immagine dell'autrice Rosso M.

bienti, dove, il livello di condensa sia a pavimento sia sulle pareti, è alto.

Inoltre, il livello dei consumi energetici, per ovviare a questi problemi di insalubrità interna, è elevato (gas metano). Pertanto, l'intervento di risanamento conservativo, sia dell'edificio, sia del microclima interno con la conseguente riduzione dei consumi, è volto al miglioramento del benessere dei fruitori, utilizzando le "antiche tecniche costruttive". Nello specifico, è stato

utilizzato "il cocchiopesto" senza l'utilizzo di film protettivi idrorepellenti, nel rispetto dei canoni di bioedilizia e di sostenibilità ambientale.

La prima fase dell'intervento, che ha visto la rimozione, nel periodo estivo, di tutta la fascia perimetrale di intonaco (circa un metro da terra), esterna ed interna, ha messo in luce la tessitura muraria portante in mattoni rossi. Le pareti, fortemente impregnate di acqua, sono state fatte respirare per circa un mese nel perio-

do estivo, con l'obiettivo di far "asciugare" in modo naturale i mattoni. Una volta verificato che la presenza di acqua nelle murature era fortemente diminuita, si è proceduto alla preparazione del cocchiopesto, utilizzando uno dei prodotti ora in commercio, analizzato e scelto per la maggior affinità con i preparati antichi.

È stata utilizzata pertanto, una malta umida predosata, composta da grassello magnesiaci di calce forte naturale (comportamento simile alle calce debolmente idrauliche per l'alta presenza di magnesio) lungamente stagionato, micronizzato e vagliato, sabbia silicea opportunamente selezionata e argille cotte a temperature tra i 900 e i 1000°C, macinate (Figura 4, 5, 6). I

materiali elencati, sono contenuti separatamente in un unico sacco da 25 kg.

I composti sono stati miscelati a mano, ed è stata aggiunta l'acqua secondo la prescrizione delle schede tecniche. Per la miscelazione manuale è stato consigliato di mettere nel contenitore prima 1-2 litri di acqua, poi il contenuto del sacchetto e alla fine l'acqua necessaria per la consistenza desiderata [9]. Dati tecnici della miscela: reazione al fuoco: classe A1; assorbimento d'acqua: W0; permeabilità al vapore acqueo: μ 10,5; adesione: 0,13 N/mm² FB: A 10; conducibilità termica l: 0,93 W/m K (valore tabulato).

Una volta ottenuta una consistenza ragionevole della miscela (né troppo liquida, né troppo

Fig. 4 Scheda tecnica del prodotto – identificazione delle sostanze
Fonte: www.calcepiascio.it

1 IDENTIFICAZIONE DELLA SOSTANZA E DELLA SOCIETA'

1.1 Identificazione del prodotto:

La malta al cocchiopesto è una malta pre-dosata con i diversi componenti in appositi scomparti separati tra loro; quanto segue fa riferimento principalmente al componente più significativo del prodotto per quanto riguarda la sicurezza e precisamente il grassello di calce; gli altri componenti (la sabbia ed il cocchiopesto) sono citati se ritenuto opportuno.

Nome della sostanza:	Calcium Magnesium dihydroxide oxide (Idrossido di calcio e ossido di magnesio) + acqua.
Sinonimi:	Calce idrata dolomitica, calce dolomitica spenta, Idrossido di calcio e magnesio, grassello, idrato dolomitico
Nome e formula chimica:	Calcium Magnesium dihydroxide oxide (Idrossido di calcio e ossido di magnesio) – Ca(OH) ₂ *MgO + acqua H ₂ O
Nomi commerciali:	Calce spenta magnesiaci in eccesso di acqua; grassello di calce.
CAS:	58398-71-3
EINECS:	261-235-4
Peso molecolare:	114 g/mol
Numero di registrazione REACH:	01-2119474879-14-0005

dura), è stata applicata a mano, una stesura dell'intonaco per regolarizzare i vecchi supporti eterogenei od irregolari. Una volta stabilizzata la struttura muraria e fatta asciugare la malta, è stata effettuata la prima stesura dell'intonaco. Le superfici prima di essere state stabilite, sono state pulite e inumidite a spruzzo. La prima ripresa ha lavorato su uno spessore di circa 1 cm. La seconda ripresa è stata effettuata dopo qualche giorno, quando la superficie non ancora completamente asciutta, poteva permettere il secondo aggrappo.

L'intonaco esterno non è stato ricoperto con nessun tipo di pittura o rivestimento sintetico impermeabilizzante in quanto, la sua applicazione, avrebbe impedito il processo di ricarbonatazione della calce. La silice, infatti, presente nell'argilla cotta a basse temperature, si lega con

la calce creando silicati di calcio che aumentano la resistenza meccanica dell'intonaco, mantenendo però la tessitura porosa e quindi la traspirabilità propria della calce. A contatto con l'aria, la silice aumenta la presa assorbendo l'anidride carbonica ed avviando così il processo di ricarbonatazione della calce [10].

La lenta presa riduce inoltre la formazione delle cavillature aumentando così la funzione regolatrice igrometrica degli ambienti. Il Coefficiente di permeabilità di questa malta, priva di additivi, al vapore è $\mu < 10,5$. L'ottima permeabilità al vapore garantisce infatti, anche una buona funzione deumidificante. La totale assenza di additivi rende tale malta compatibile con i vecchi manufatti ed utilizzabile in bio edilizia. Lo stesso procedimento è stato effettuato anche nella parte interna dell'edificio, dove,

3 COMPOSIZIONE/INFORMAZIONE SUGLI INGREDIENTI

3.1 Sostanze

Principale costituente : Grassello di calce (22 – 28 %)

Nome: Calcium magnesium dihydroxide oxide (Idrossido di calcio e ossido di magnesio)

N° CAS: 58398-71-3

N° EINECS: 261-235-4

Altri componenti : Sabbia naturale di quarzo non macinata (72 – 80 %)

Diametro particelle superiori a 5 micron >99,9 % in peso

N° CAS: 14808-60-70

N° EINECS: 238-878-4

Altri componenti : Coccio pesto (5 – 12 %)

Mattone macinato di colore rosso o beige

Impurezze

Nessuna impurezza rilevante per la classificazione e l'etichettatura

Fig. 5 Scheda tecnica del prodotto – composizione e informazioni sui componenti
Fonte: www.calcepiascio.it

Fig. 6 scheda tecnica del prodotto - proprietà fisiche e chimiche
Fonte: www.calcepiasco.it

9.1 Informazioni sulle proprietà fisiche e chimiche fondamentali (riferite al grassello di calce)

Aspetto:	pasta bagnata.
Odore:	inodore.
Soglia olfattiva:	non applicabile.
pH:	11.7 (soluzione satura a 20 °C).
Punto di fusione:	> 450 °C (study result, EU A.1 method).
Punto di ebollizione iniziale:	non applicabile (solido con punto di fusione > 450 °C).
Punto di infiammabilità:	non applicabile (solido con punto di fusione > 450 °C).
Tasso di evaporazione:	non applicabile (solido con punto di fusione > 450 °C).
Infiammabilità:	non infiammabile (study result, EU A.10 method).
Limiti di esplosività:	non esplosivo (priva di qualsiasi struttura chimica comunemente associata a proprietà esplosive).
Tensione di vapore:	non applicabile (solido con punto di fusione > 450 °C).
Densità di vapore:	non applicabile.
Densità relativa:	2.59 (study result, EU A.3 method).
Solubilità in acqua:	1851.42 mg/L (study result, EU A.6 method).
Coefficiente di ripartizione:	non applicabile (sostanza inorganica).
Temperatura di autoaccensione:	nessuna temperatura di autoaccensione sotto i 400 °C (study result, EU A.16 method).
Temperatura di decomposizione:	quando riscaldato oltre 580 °C, la sostanza si decompone in Ossido di Calcio (CaO) e acqua (H ₂ O).
Viscosità:	non applicabile (solido con punto di fusione > 450 °C).
Proprietà ossidanti:	nessuna proprietà ossidante (Sulla base della struttura chimica, la sostanza non contiene un eccesso di ossigeno o gruppi strutturali conosciuti per essere correlati con reazioni esotermiche con materiale combustibile).

una volta asciugato il prodotto, è stata applicata una tempera ad acqua traspirante bianca (Figura 7).

L'applicazione della tempera è stata una scelta del cliente, ma tecnicamente non strettamente necessaria, in quanto, il cromatismo naturale del prodotto, è in grado di conferire un armonioso colore roseo (Figura 8) determinato dalla presenza di argilla cotta nel composto.

4. Monitoraggio invernale 2022

I parametri igrotermici [11] degli ambienti interni sono da considerarsi all'interno dei valori definiti dalla normativa e sono nettamente migliorati rispetto ai dati rilevati prima dell'intervento. È stato, infatti introdotto anche un impianto di fan-coil per la regolazione controllata dell'aria interna in quanto, la disposizione delle finestre, per la ventilazione corretta degli ambienti era insufficiente a garantire un idoneo

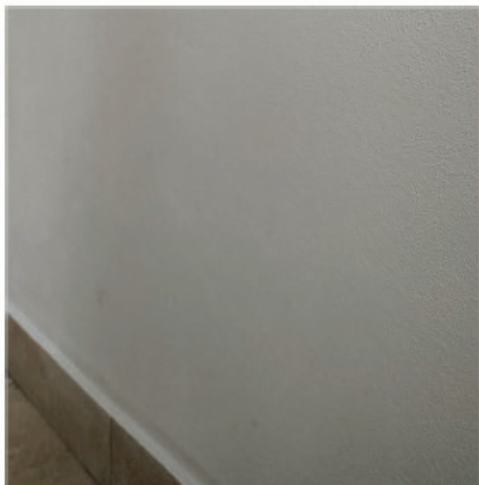


Fig. 7 Particolare della muratura interna dopo l'intervento di risanamento

Fonte: Immagine dell'autrice Rosso M.

Fig. 8 Particolare della muratura esterna in condizioni normali climatiche

Fonte: Immagine dell'autrice Rosso M.

ricambio d'aria a supporto del sistema di riscaldamento a terminali gestiti con caldaia a gas e provvisti di valvole termostatiche ognuno. L'intonaco esterno si è presentato stabile e ben compatto completamente assente di fessurazioni, sbollature e umidità di risalita. È interessante notare il processo di asciugatura [12] dopo condizioni climatiche avverse (Figura 9, 10) dove le parti più scure che hanno assorbito l'acqua diventano piano piano più chiare rilasciando l'acqua in ambiente esterno.

5. Monitoraggio estivo 2022

Dopo un'attenta verifica si è potuto constatare che anche in estate i parametri microclimatici interni rispondono perfettamente alla normativa vigente in materia.

L'intonaco si è mantenuto in condizioni perfette (Figura 11, 12) ad esclusione di una particolare situazione che si è verificata nella parete a nord (Figura 13, 14).

In questa circostanza, cosa che non era presente nel monitoraggio del 2019, si può notare come l'applicazione di questo intonaco su uno preesistente realizzato con cemento non abbia avuto efficacia. O meglio, il livello di scambio termico per l'asciugatura della parete è avvenuto o avviene appena sopra la soglia di cemento.

All'epoca, non era stata rimossa per volere del committente questa fascia perché erano state appena installate le luci a parete per l'illuminazione perimetrale della casa. Grazie però a questo "errore" è possibile vedere come l'umidità di risalita venga portata via dall'aria quasi immediatamente sopra questo livello di impermeabilità. In pochi centimetri di altezza l'acqua

Fig. 9 Muratura esterna in fase di asciugatura
Fonte: Immagine dell'autrice Rosso M.

Fig. 10 Particolare
Fonte: Immagine dell'autrice Rosso M.



evapora. Questa finestra viva permette di comprendere l'indiscussa efficacia di questa tecnica. L'abitazione è stata dotata anche di un sistema di produzione autonoma di corrente a fotovoltaico per ridurre i consumi di energia elettrica implementati dall'adozione di un impianto di fan-coil a pompa di calore.

La regolazione controllata dell'aria interna permette non solo di prestabilire i parametri da raggiungere ma soprattutto in questo caso, compensa una carente ventilazione naturale causata dalla non contrapposta disposizione delle finestre dei vari ambienti [13].

Gode comunque ancora di un sistema di riscaldamento a terminali gestiti con caldaia a gas e provvisti di valvole termostatiche ognuno, ma il suo oculato utilizzo ha notevolmente ridotto consumi e costi proprio in funzione dell'adozione di un sistema integrato di riscaldamento.

6. Conclusioni

Ad oggi, fatto salvo il caso specifico suindicato, che necessiterà di un nuovo piccolo intervento di bonifica, non si sono più rilevati problemi di umidità di risalita né di condense interne. I valori di umidità interna e di velocità dell'aria sono idonei ai valori standard della normativa vigente in materia e il benessere delle persone che vivono questi ambienti sono nettamente migliorati. Il passato non è altro che un esempio di ciò che altri, prima di noi, hanno intuito, sperimentato e realizzato. Parlare pertanto di bioedilizia significa rivedere in un'altra luce il nostro passato, o meglio, capire, selezionare e riproporre, adattando scoperte a ciò che oggi ci serve per vivere bene. Non solo, ma una buona progettazione può avere anche grandi ricadute sul risparmio economico nella riqualificazione degli edifici, sia



Fig. 11 Particolare dell'esterno – monitoraggio estivo 2022
Fonte: Immagine dell'autrice Rosso M.

Fig. 12 Particolare dell'esterno – monitoraggio estivo 2022
Fonte: Immagine dell'autrice Rosso M.

Fig. 13 Particolare dell'interno – monitoraggio estivo 2022
Fonte: Immagine dell'autrice Rosso M.



Fig. 14 Particolare dell'esterno – monitoraggio estivo 2022
Fonte: Immagine dell'autrice Rosso M.

in termini di intervento, sia in termini di manutenzione.

I costi, infatti, in questo risanamento edilizio, sono stati fortemente abbattuti, perché non è stato necessario “tinteggiare” esternamente

l'involucro edilizio, e non sarà mai più necessario porre mano all'intonaco esterno se non per lavorazioni strutturali di ampliamenti o demolizioni: una totale assenza di manutenzione ordinaria.

Bibliografia

1. Rosso M., Agostinelli S., *L'utilizzo delle malte naturali in Bioedilizia per l'efficientamento energetico e per il miglioramento microclimatico negli edifici residenziali: il cocciopesto*, DEI vol. 3, **2019**, pp. 25-27.
2. Paolo Clini, *De Architectura*, Il trattato di Vitruvio, <https://www.centrostudivitruviani.org/studi/de-architettura/>
3. Romano, E., *Fra astratto e concreto*, in *Vitruvio, De Architectura*, ed. Einaudi, **1997**.
4. Gasparoli P., *Le superfici esterne degli edifici*, Alinea Firenze, **2002**, pp. 240-243
5. Milizia F., *Principi di architettura civile*, Bassano, Tipografia G. Remondini e Figli, **1823**.
6. Adam J. P., *L'arte di costruire presso i romani. Materiali e tecniche*. Longanesi, Milano **1989**, pp. 69-90.
7. Feiffer C., *La conservazione delle superfici intonacate – Il metodo e le tecniche*, Skira, Milano, **1997**.
8. Carria, F., *La manutenzione delle facciate, tecnologie e metodi per il recupero*. Tecniche Nuove, Milano, **2004**.
9. www.calcepiasco.it
10. Amoroso G. G., *Trattato di scienza della conservazione dei monumenti*, Alinea Firenze, **2002**, pp. 274-280
11. Moncada, Lo Giudice G., De Santoli L., *Benessere termico, acustico e visivo*, vol. 3, Casa Edidtrice Ambrosiana, **1999**.
12. Moncada, Lo Giudice G., De Santoli L., *Trasmissione del calore*, vol. 2, Casa Edidtrice Ambrosiana, **1999**.
13. Neufeert E., *Enciclopedia pratica per progettare e costruire*, ed. UrlicoHoepli, Milano, **1999**.

Monitoraggio microclimatico nel Museo della Città e del Territorio di Narni (Terni, Italia): esigenze di fruizione ed aspetti di conservazione di dipinti su tavola

Claudia Pelosi¹, Luca Lanteri², Bruno Blanco³

¹ Professore Associato presso il Dipartimento di economia, ingegneria, società, impresa, Università degli Studi della Tuscia, Viterbo, Italia

² Professore a contratto presso il Dipartimento di economia, ingegneria, società, impresa, Università degli Studi della Tuscia, Viterbo, Italia

³ Componente di Archeoares – Servizi per i beni culturali e il turismo, Terni, Italia

This contribution reports the case study relating to microclimatic monitoring conducted for a year in the Museum of Palazzo Erolì in Narni and, specifically, in the Sala del Ghirlandaio and in the adjacent didactic room. The methodology used for monitoring is illustrated and finally the results are reported and discussed also in relation to the external climate taken from the weather station closest to the Narni area. The results show that, despite the recorded data generally do not fall within the wellness area defined by UNI 10829 and by Ministerial Decree no. 238 of 2001, however conditions of the two environmental parameters are never created such as to favour the development of biodeterioration. In addition, the microclimate within the museum's rooms is influenced by the

external climate which therefore determines both seasonal trends and some consistent variations. The temperature in summer remains stable thanks to the air conditioning system while in spring, autumn and winter it varies a lot, in accordance with seasonal variations, reaching very low values, even below 10 °C, creating an environment that is not favourable to the visitor, although not particularly problematic for the paintings. Relative humidity values turned out to be more stable on an annual scale, but much less on a monthly scale with wide variations, especially in winter. While these variations do not create problems for visitors, on the other hand they present a risk for panel paintings as they can cause dimensional variations in the wood.

1. Introduzione

La conservazione delle opere d'arte in ambienti confinati pone il problema del controllo dei parametri microclimatici importanti e, per certi materiali, fondamentali ai fini della loro salvaguardia [1, 2, 3, 4]. Nel nostro secolo l'inquinamento atmosferico crescente e, soprattutto per le opere d'arte nei musei, il grande afflusso di pubblico hanno portato a valutare con sempre maggiore attenzione il problema della conservazione negli ambienti confinati anche al fine di limitare gli interventi di restauro [5, 6, 7]. A questo proposito, soprattutto negli ultimi venti anni circa, sono state elaborate una serie di norme e raccomandazioni la cui conoscenza è fondamentale per la gestione della conservazione del patrimonio culturale. Vale la pena ricordare le principali norme e linee guida relative alle condizioni ambientali di conservazione. Prima fra tutte la UNI 10829 del luglio 1999 dal titolo "Beni di interesse storico e artistico. Condizioni ambientali di conservazione. Misurazioni ed analisi" che prescrive una metodologia per la misurazione delle grandezze ambientali ai fini della conservazione di beni di interesse storico e artistico e fornisce indicazioni relative alle modalità di elaborazione e sintesi dei dati rilevati, per una loro valutazione finalizzata al contenimento dei processi di degrado. La UNI 10829 riporta in appendice i valori di riferimento da considerare per i parametri ambientali relativi alla conservazione di 33 categorie di materiali e oggetti in condizioni di clima stabile nel tempo, al fine di progettare nuovi impianti di climatizzazione per ambienti museali.

Il Decreto Ministeriale n. 238, elaborato dal

Ministero per i Beni e le Attività Culturali nel 2001, fornisce i criteri tecnico-scientifici e gli standard minimi da osservare in modo da garantire un adeguato livello di fruizione collettiva dei beni, la loro sicurezza e la prevenzione dei rischi negli ambienti museali [8]. Nella parte intitolata Ambito VI, Sottoambito 1, par. 2, vengono definiti, in particolare, i parametri ambientali importanti ai fini della conservazione delle opere d'arte: microclimatici; di illuminazione; di qualità dell'aria. Inoltre, in appendice vengono riportate alcune tabelle con i valori termoigrometrici consigliati per le varie classi di materiali con la precisazione che la scelta delle condizioni migliori deve chiaramente essere decisa di volta in volta in relazione allo stato di conservazione dei manufatti, all'area geografica ed alla reale possibilità di assicurarsi la costanza dei valori. Il Decreto fornisce anche raccomandazioni per quel che concerne l'accesso al pubblico. Infatti, nella parte intitolata Ambito VII fornisce indicazioni relative alle condizioni di accessibilità e fruibilità delle strutture museali. Relativamente alle condizioni ambientali, al paragrafo 3.5.5 (pagina 201) il Decreto raccomanda di curare gli aspetti della qualità ambientale quali l'illuminazione, le condizioni termoigrometriche e di ricambio dell'aria che dovranno essere idonee per il benessere delle persone e per la conservazione delle opere d'arte, condizioni che spesso non coincidono e che quindi dovranno necessariamente portare ad un compromesso.

Una successiva importante norma è la UNI 10929 del febbraio 2002 dal titolo "Beni Culturali: principi generali per la scelta e il controllo

del microclima per la conservazione dei beni culturali in ambienti interni, quali musei, gallerie, archivi, biblioteche, chiese e palazzi storici". Questa norma rappresenta una significativa evoluzione perché parte dal presupposto che è impossibile fissare per ogni oggetto precisi valori di soglia o intervalli di valori ottimali dei parametri ambientali ai fini della conservazione. È però possibile stabilire dei principi generali cui debbano necessariamente attenersi quanti hanno responsabilità di conservazione. La norma stabilisce anche che per ogni oggetto è necessario considerare la sua storia pregressa, in cui il microclima ha determinato un assestamento del materiale, in risposta alle forze ambientali esterne e alle proprie caratteristiche fisico-chimiche.

Per completare il quadro normativo è doveroso citare anche le più attuali norme europee dedicate alla conservazione del patrimonio culturale con specifico riferimento al microclima.

- UNI EN 15757:2010: Conservation of Cultural Property - Specifications for temperature and relative humidity to limit climate-induced mechanical damage in organic hygroscopic materials

- UNI EN 15758:2010: Conservation of Cultural Property - Procedures and instruments for measuring temperatures of the air and the surfaces of objects

- EN 16141:2010 Conservation of cultural heritage - Guidelines for management of environmental conditions - Open storage facilities: definitions and characteristics of collection centres dedicated to the preservation and management of cultural heritage.

- EN 15759-1:2011: Conservation of cultural property - Indoor climate - Part 1: Guidelines for heating churches, chapels and other places of Worship.

- EN 16242:2011: Conservation of cultural property - Procedures and instruments for measuring humidity in the air and moisture exchange between air and cultural property.

Recentemente è stato proposto un adeguamento della terminologia utilizzata in queste normative, in modo particolare nella UNI EN 15757:2010, in modo da uniformare alcuni concetti e termini impiegati in maniera a volte generica e diversa da studiosi e ricercatori vari [9]. Il controllo del microclima diviene tanto più importante quanto più le opere d'arte stesse sono costituite da materiali compositi e/o sensibili alle variazioni termoigrometriche. I materiali sensibili come quelli di tipo organico (carta, legno, tessuti, ecc.) necessitano, infatti, di condizioni stabili di umidità relativa e temperatura evitando soprattutto le variazioni più repentine.

Occorre sottolineare il fatto che il controllo delle condizioni termoigrometriche di un ambiente, nel caso si utilizzino sistemi di condizionamento e riscaldamento, può diventare un problema molto complesso, sia perché non è sempre facile realizzare condizioni uniformi di temperatura e umidità nello spazio e nel tempo, ma anche perché occorre verificare costantemente il funzionamento degli impianti di condizionamento [3, pp. 19-31]. In più si aggiunge il fatto che nella maggior parte dei casi, almeno in ambito Europeo, i musei e le esposizioni sono collocate in edifici e palazzi storici dove è diffi-

cile se non impossibile talvolta installare impianti di condizionamento [10].

La presenza di sistemi di condizionamento è spesso funzionale al soddisfacimento dei requisiti di benessere per i visitatori e non sempre tali requisiti si trovano in accordo con quelli che sarebbero necessari per una corretta conservazione delle opere d'arte. La presenza di visitatori all'interno di musei o generalmente ambienti confinati è un altro aspetto molto importante da considerare nella gestione della conservazione dei beni esposti. Il pubblico, infatti, può apportare, se numeroso, notevoli quantità di calore, vapore e anidride carbonica alterando il naturale equilibrio degli ambienti. Se i visitatori sono eccessivamente numerosi un ambiente, che di per sé è idoneo alla conservazione di un determinato tipo di bene, potrebbe non esserlo più imponendo perciò una limitazione al numero di persone presenti contemporaneamente nella sala e al tempo di permanenza [3, pp. 31-33].

Tenendo in considerazione tutti questi aspetti è possibile, anche se non semplice, programmare in maniera corretta e il più completa possibile il controllo del microclima, attraverso l'impiego di piccoli strumenti portatili di rilevamento ambientale [11] come verrà riportato in seguito nel caso studio scelto per questo contributo, ovvero le sale della Pinacoteca del Museo della Città e del Territorio di Narni, un piccolo comune in provincia di Terni nella Regione Umbria. Installando, infatti, dei semplici datalogger è stato eseguito un monitoraggio completo dell'umidità relativa (RH%) e della temperatura (in °C) per un anno intero poten-

do così controllare gli andamenti dei due parametri, evidenziare situazioni particolari e delineare quello che la norma UNI 15757 definisce "historical climate": *climatic conditions in a microenvironment where a cultural heritage object has always been kept, or has been kept for a long period of time (at least one year) and to which it has become acclimatized*. Il concetto di clima storico è molto importante perché definisce quelle condizioni che, anche se non rientrano nei range fissati dal Decreto Ministeriale o dalla norma UNI 10829, sono però reali per gli oggetti conservati in quel determinato ambiente: i manufatti si sono acclimatati stabilizzandosi a quei valori. Se ne dovrà tenere conto, ad esempio, in caso di restauro delle opere per il quale sia richiesto un loro trasferimento in locali diversi del Museo o presso laboratori di restauro.

2. Caso studio: il Museo di Palazzo Erola a Narni

Al centro dell'antica città di Narni, nel quartiere di Fraporta, sorge palazzo Erola, sede del Museo della Città e del Territorio. Il Palazzo fu costruito nel XVII secolo dalla nobile famiglia narnese degli Erola. L'esposizione museale si suddivide tra i due piani della struttura: al primo si conservano reperti dalla protostoria di Narni con utensili e fossili come le zanne dell'*Elephas Antiquus* ritrovato agli inizi del XX secolo nel circondario narnese, proseguendo per l'età romana con reperti relativi all'antica Narnia fino al periodo medievale. In questa sezione viene

delineata la vita del famoso capitano di ventura Erasmo da Narni detto il Gattamelata, ed è ospitata anche una mummia egizia con sarcofago, frutto della donazione degli anni '30 da parte di un collezionista romano residente a Narni (<https://www.archeoares.it/palazzo-eroli/>).

Al secondo piano si trova la Pinacoteca nella quale sono esposte opere che abbracciano un ampio arco temporale che va dal XIV al XVIII secolo: tra i capolavori più rilevanti è possibile ammirare l'Annunciazione di Benozzo Gozzoli, proveniente dalla chiesa di San Domenico e la pala con l'Incoronazione della Vergine di Domenico Ghirlandaio, opere entrambe commissionate dal Cardinale Berardo Erolì nella seconda metà del XV secolo.

Le due opere sono collocate in una sala apposita con un sistema di climatizzazione centralizzato e illuminazione appositamente progettata al fine di conservare nelle migliori condizioni possibili le due opere su tavola (Figura 1). Il legno è, infatti, uno dei materiali più

sensibili alle variazioni termoigrometriche che, se repentine, possono causare microfessurazioni che estendendosi provocano alterazioni strutturali del supporto con conseguenze dannose anche per la pellicola pittorica ad esso strettamente connessa [12]. Inoltre, il legno può subire anche attacco biologico da parte di vari agenti di degrado che si sviluppano soprattutto in condizioni ottimali di temperatura e umidità relativa [13, 14, 15]. Per questa tipologia di manufatti è pertanto essenziale un controllo delle condizioni ambientali di conservazione [16, 17, 18].

Il percorso all'interno del Museo di Palazzo Erolì è accompagnato da proiezioni, riproduzioni multimediali e musiche evocative che approfondiscono in maniera emotiva e coinvolgente quanto viene mostrato. Recentemente la gestione del Museo è stata affidata alla società Archeoares che ha avviato una serie di attività e rinnovamenti all'interno della struttura, tra cui il controllo degli aspetti microclimatici del-

Fig. 1 Sala del Ghirlandaio.

(a) vista della pala con l'Incoronazione della Vergine

(b) vista con il dipinto su tavola di Benozzo Gozzoli raffigurante l'Annunciazione.

Fonte: Immagine degli autori Pelosi, C., Lanteri, L., Blanco B.



a

b

le sale, principalmente quelle dove sono conservate opere importanti e sensibili alle condizioni ambientali, come appunto la sala dove sono esposte le due tavole sopra brevemente descritte.

3. Parte sperimentale

Il monitoraggio è stato possibile grazie alla disponibilità della Società Archeoares che gestisce il Museo della Città e del Territorio di Narni, all'interno del quale si colloca la Pinacoteca, e al Comune di Narni che hanno consentito di fare le misure dando libero accesso alla sala oggetto di studio con grande disponibilità e partecipazione.

Le misure di umidità relativa (RH%) e di temperatura (T, in °C) sono state eseguite nell'arco di un anno, da settembre 2021 ad agosto 2022, come raccomandato dalla normativa UNI EN 15757:2010 al fine di coprire tutti i cicli stagionali. Sono stati utilizzati due data-logger Testo 175-H2 con un range di misurazione per l'umidità relativa dallo 0% al 100% con una precisione di +/- 3.0% e per la temperatura un range che va da -20°C a 70°C con una precisione di +/- 0.5°C. Un data-logger è stato posizionato in prossimità della Pala del Ghirlandaio, l'altro in corrispondenza dei pannelli esplicativi della sala didattica in modo da evitare fonti dirette di illuminazione e calore. Il secondo data-logger è stato utilizzato per avere un confronto anche con altri ambienti del Museo, dove non è presente l'impianto di climatizzazione attivo nei mesi estivi nella Sala del Ghirlandaio.

I data-logger sono stati impostati per registrare nell'arco di una giornata i valori di temperatura in gradi centigradi (°C) e di umidità relativa (%) ad intervalli di sessanta minuti, per un totale di ventiquattro misurazioni giornaliere. I dati acquisiti sono stati memorizzati dai data-logger e successivamente trasferiti su computer alla fine di ogni ciclo stagionale, attraverso lo specifico programma Testo Comfort Software Basic, per essere poi rielaborati mediante il foglio di lavoro elettronico di Excel. Sono stati calcolati i valori massimi, minimi e medi stagionali e giornalieri, le medie giornaliere e notturne, le deviazioni standard.

4. Risultati e discussione

I dati ricavati dagli strumenti posizionati nelle sale del Museo di Palazzo Erosi possono essere elaborati con diverse modalità al fine di valutare gli andamenti annuali, quelli mensili, quelli giornalieri, variazioni giorno-notte, matrici di tolleranza sulla base degli standard previsti dalla normativa ecc. Le matrici di tolleranza sono dei grafici in cui si riportano tutti i valori registrati della temperatura in funzione dell'umidità relativa e si tracciano i segmenti che definiscono le soglie stabilite dalla norma UNI 10829. Questi segmenti definiscono un'area all'interno della quale le coppie di valori T-UR% dovrebbero trovarsi per garantire il benessere del manufatto [19, 20, 21]. Per i manufatti definiti "Sculpture policrome di legno, legno dipinto, pitture su legno, icone, pendole di legno, strumenti musicali di legno", i valori consigliati sono:

50-60% per l'UR% con una massima escursione giornaliera del 4%; 19-24 °C per la temperatura con una massima escursione giornaliera di 1,5 °C.

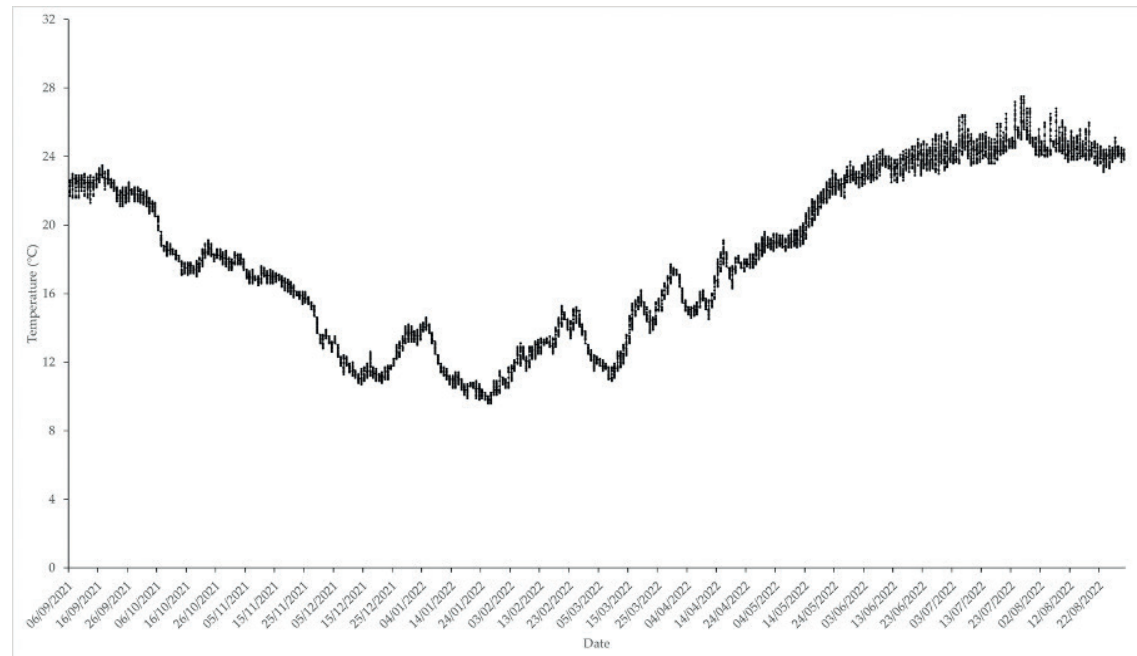
Come primo risultato viene riportato l'andamento complessivo dell'umidità relativa (Relative Humidity %, RH%) e della temperatura (Temperature in °C) nella sala del Ghirlandaio su tutto il periodo di monitoraggio (Figure 2 e 3).

Relativamente alla temperatura si può osservare un andamento che, su scala annuale, segue le variazioni stagionali con valori che ricalcano quelli tipici del periodo dell'anno. Passando, infatti, dalla stagione autunnale a quella invernale, i valori di temperatura scen-

dono progressivamente arrivando anche al di sotto di 10 °C nel periodo dal 19 al 27 gennaio 2022, fino alle 11 nei giorni dal 19 al 24 e fino alle 16 del pomeriggio dal 25 al 27 gennaio.

Le temperature cominciano progressivamente a risalire nel periodo primaverile per arrivare a valori elevati nella stagione estiva dove però si mantengono più stabili grazie all'impianto di climatizzazione attivo nella sala, tranne alcuni picchi a fine luglio dove si raggiungono temperature di oltre 27 °C. Alcuni picchi di temperatura sono evidenti a febbraio, marzo e aprile e si verificano nelle ore pomeridiane con un associato incremento anche dei valori di umidità relativa. Questi punti potreb-

Fig. 2 Andamento dei valori di temperatura in tutto l'arco temporale registrato (settembre 2021-agosto 2022) nella Sala del Ghirlandaio.
Fonte: Immagine degli autori Pelosi, C., Lanteri, L., Blanco B.



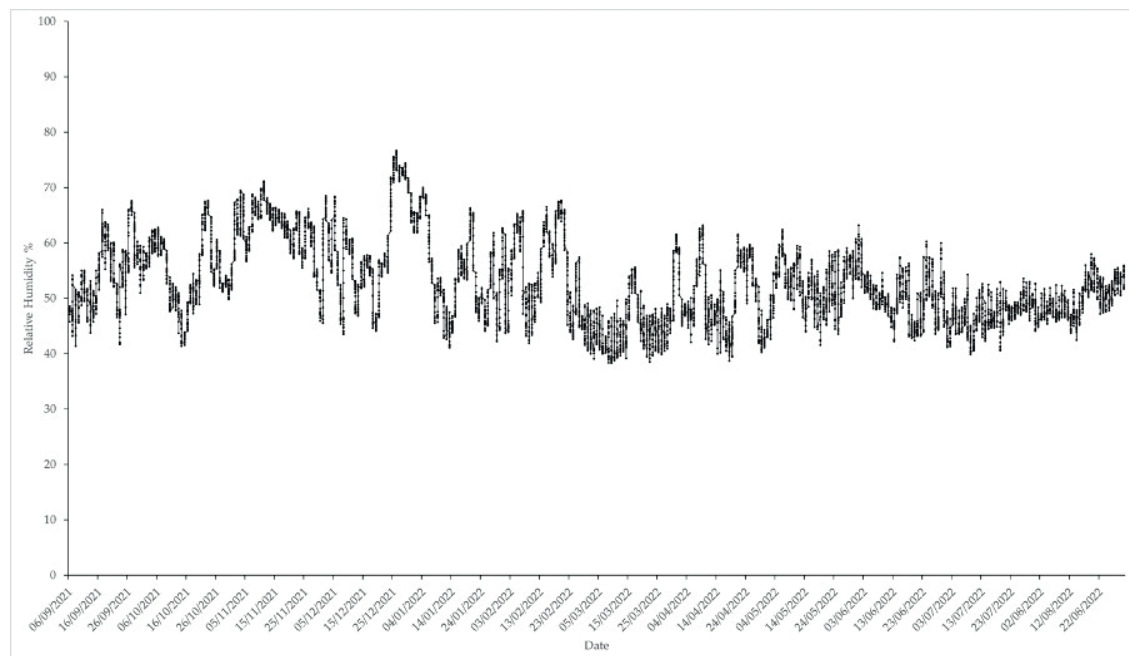


Fig. 3 Andamento dei valori di umidità relativa in tutto l'arco temporale registrato (settembre 2021-agosto 2022) nella Sala del Ghirlandaio. Fonte: Immagine degli autori Pelosi, C., Lanteri, L., Blanco B.

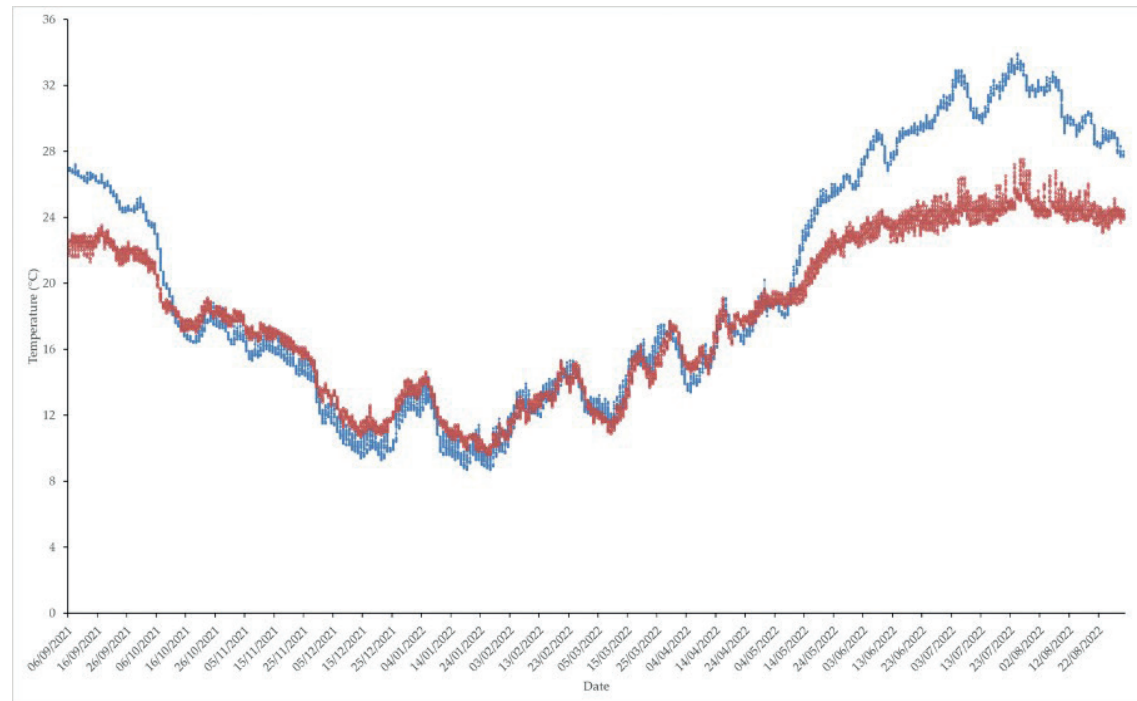
bero essere associati a fenomeni meteorologici esterni poiché non si sono verificati afflussi consistenti di pubblico in alcuno dei giorni o periodi interessati. Considerando il benessere delle due tavole conservate all'interno della Sala del Ghirlandaio, ma soprattutto del pubblico, certamente la stagione più problematica è quella invernale. Le basse temperature, infatti, rendono “poco piacevole” la visita e la permanenza all'interno dell'ambiente.

Per quanto riguarda invece i valori di umidità relativa l'andamento complessivo rimane definito in un range piuttosto limitato durante tutto l'anno anche se si osservano nel grafico oscillazioni piuttosto grandi a livello giornaliero come, ad esempio, quelle che si

verificano tra il 25 e il 26 dicembre 2022 che plausibilmente sono legate alla piovosità elevata registrata dalla centralina meteo più vicina (<https://www.ilmeteo.it/portale/archivio-meteo/Narni/2021/Dicembre>) con valori di umidità relativa percentuale superiori al 90%. Questo risultato conferma chiaramente che il microclima nella Sala del Ghirlandaio durante i mesi in cui non sono attivi sistemi di climatizzazione (ovvero primavera, estate e autunno) è determinato da quello stagionale esterno e i picchi di temperatura e umidità relativa sono dovuti a variazioni esterne significative.

A conferma di questa deduzione, sono stati confrontati i dati registrati dal data-logger del-

Fig. 4 Confronto degli andamenti dei valori di temperatura in tutto l'arco temporale registrato (settembre 2021-agosto 2022) dal datalogger nella Sala del Ghirlandaio (curva rossa) e nella sala didattica (curva azzurra).
Fonte: Immagine degli autori Pelosi, C., Lanteri, L., Blanco B.



la Sala del Ghirlandaio con quelli registrati nella sala didattica (Figure 4 e 5).

Come è possibile vedere dai grafici a confronto, gli andamenti della temperatura e dell'umidità relativa sono del tutto analoghi e seguono chiaramente gli andamenti stagionali.

Una differenza consistente si osserva nel periodo estivo poiché nella sala didattica non è presente un impianto di climatizzazione per cui le temperature si innalzano sensibilmente a causa del caldo esterno. In questa sala non sono presenti opere esposte ma solo pannelli esplicativi e un sistema di proiezione video. Tuttavia, nel periodo estivo l'ambiente risulta eccessivamente caldo e secco con valori di temperatura

che arrivano a 34°C (valore registrato nella sala didattica alle 17 e 30 del 25 luglio 2022) e di umidità relativa che scendono a 33,5% (valore registrato nella sala didattica il 19 luglio 2022 alle ore 15 e 30), non rispettando quindi il benessere dei visitatori potenzialmente interessati a conoscere meglio la storia del Museo e delle collezioni attraverso le informazioni ricavabili dalla sala didattica. Da sottolineare che questi valori sono perfettamente giustificati se si tiene conto del clima esterno in quanto nel mese di luglio 2022 (<https://www.ilmeteo.it/portale/archivio-meteo/Narni/2022/Luglio>) sono stati misurati valori medi di temperatura e umidità relativa pari a 31 °C e 33,5% rispetti-

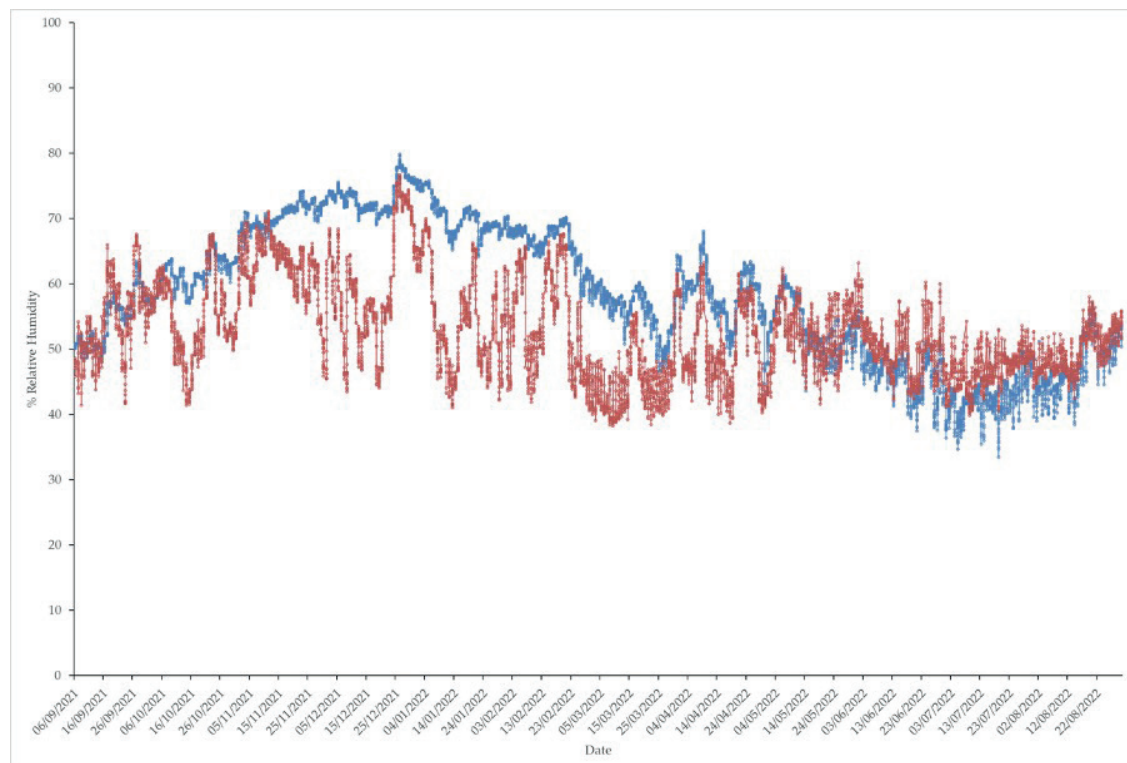


Fig. 5 Confronto degli andamenti dei valori di umidità relativa in tutto l'arco temporale registrato (settembre 2021-agosto 2022) dal datalogger nella Sala del Ghirlandaio (curva rossa) e nella sala didattica (curva azzurra). Fonte: Immagine degli autori Pelosi, C., Lanteri, L., Blanco B.

vamente, con massimi di temperatura pari a 34,1 °C e di umidità relativa del 62% (dato registrato il 18 luglio 2022, determinato da una notevole piovosità).

I valori di umidità relativa non sono sfavorevoli per il pubblico che visita la Sala del Ghirlandaio perché rimangono sempre entro limiti accettabili per il benessere del visitatore, mentre invece potrebbero, in alcuni casi, essere pericolosi per i manufatti lignei. Improvvisi cambiamenti di questo parametro potrebbero, infatti, innescare fenomeni di movimento del legno, dovuti alla variazione del contenuto d'acqua che,

come ben noto, sono differenziati a causa dell'anisotropia del materiale con conseguente deformazione del supporto e degrado della pellicola pittorica [22, 23]. Sarebbe quindi opportuno evitare queste variazioni repentine e consistenti dei valori di umidità relativa, ad esempio, con la semplice installazione di un dispositivo di controllo (deumidificatore/umidificatore) da attivare soprattutto nei periodi di alta intensità di frequentazione del Museo e soprattutto della Sala del Ghirlandaio, essendo certamente questa una delle maggiori attrazioni della Pinacoteca e dell'intera collezione. I valori com-

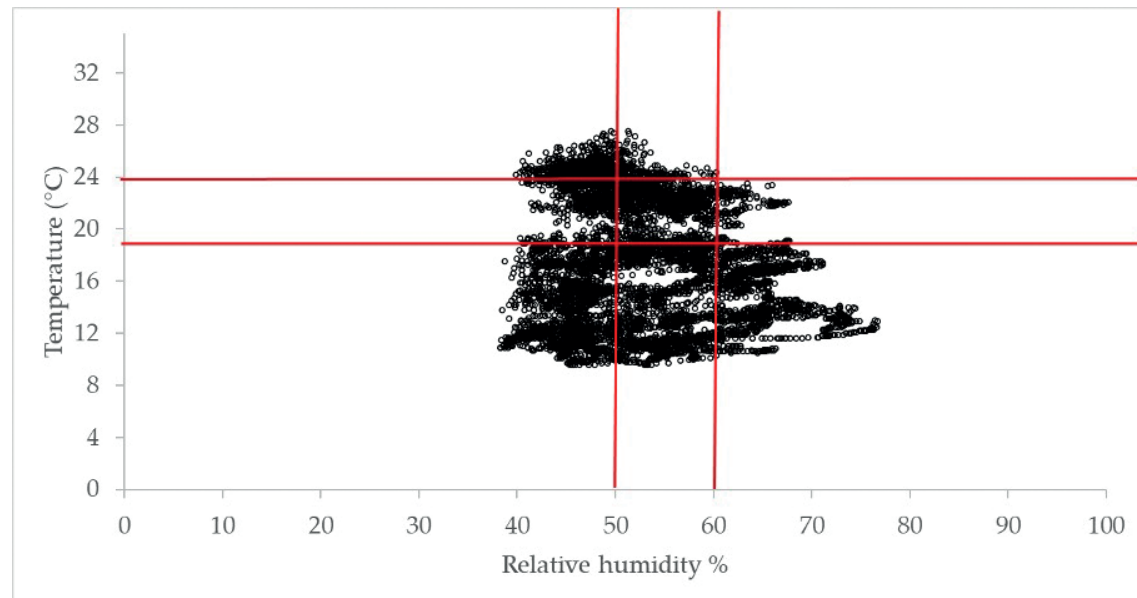
lessivi di temperatura e umidità relativa registrati nella Sala del Ghirlandaio sono stati inseriti in una matrice di tolleranza al fine di evidenziare la loro distribuzione e collocazione rispetto alle soglie stabilite dalla normativa UNI 10829 (Figura 6). Come è possibile vedere dalla Figura 6 le soglie definite dalla normativa suddetta sono molto restrittive per i manufatti lignei e difficilmente possibili da rispettare soprattutto per gli edifici storici, come già detto in precedenza. Infatti, come è possibile ricavare dalla matrice di tolleranza, solo una minima parte dei valori registrati si trova all'interno dell'area di benessere definita dalle linee rosse orizzontali (range di temperatura) e verticali (range di umidità relativa), mentre la maggior parte si trovano al di fuori di questa piccola area. Dalla matrice di tolleranza si evidenzia subito come

i valori di temperatura siano per la maggior parte al di sotto del limite inferiore (19 °C) mentre quelli di umidità relativa rientrano con maggiore frequenza nei limiti di tolleranza (50-60 %).

Un dato importante e positivo per le due opere su tavola, che si evidenzia dalla matrice di tolleranza, è il fatto che nessun dato si colloca nel quadrante con valori di umidità relativa maggiori del 60% e di temperatura maggiori di 24 °C evitando quindi la possibilità di un attacco biologico che sarebbe favorito da condizioni di elevata temperatura e umidità relativa.

Un'ulteriore elaborazione dei dati ambientali è riportata in Tabella 1 dove sono stati calcolati i valori medi per ogni mese con le relative deviazioni standard, i massimi e i minimi

Fig. 6 Matrice di tolleranza con i valori (in nero) registrati durante tutto il periodo di monitoraggio (settembre 2021 – luglio 2022). Le linee rosse definiscono i valori limite entro i quali si dovrebbero contenere l'umidità relativa e la temperatura per una corretta conservazione delle tavole dipinte.
Fonte: Immagine degli autori Pelosi, C., Lanteri, L., Blanco B.



MONTH	RH%	T (°C)	Max RH%	Min RH%	Max T (°C)	Min T (°C)
September-2021	54,3±5,85	22,2±0,48	67,6	41,4	23,5	21,1
October-2021	54,7±5,77	18,7±1,30	67,7	41,4	22,0	17,0
November-2021	62,6±4,41	16,5±1,07	71,1	45,9	18,4	13,1
December-2021	59,5±8,74	12,1±0,93	76,7	43,5	14,2	10,7
January-2022	54,6±7,49	11,2±1,41	70,0	41,1	14,6	9,6
February-2022	54,7±7,54	13,1±1,14	67,7	41,6	15,3	10,5
March-2022	45,2±4,84	13,9±1,93	61,6	38,3	17,7	10,9
April-2022	50,1±5,97	16,9±1,33	63,2	38,7	19,6	14,5
May-2022	52,4±4,25	20,7±1,57	62,4	41,6	23,7	18,5
June-2022	50,2±4,10	23,6±0,57	63,2	42,2	25,3	22,2
July-2022	46,9±2,65	24,8±0,74	67,6	39,9	27,5	23,4
August-2022	49,7±3,02	24,4±0,54	58,0	42,5	26,8	23,1

Tabella 1. Valori medi, scarti, massimi e minimi mensili dei parametri misurati nella Sala del Ghirlandaio su tutto l'arco dell'anno monitorato.

Fonte: Tabella elaborata degli autori Pelosi, C., Lanteri, L., Blanco B.

per l'umidità relativa e la temperatura, sempre per la Sala del Ghirlandaio.

I valori medi evidenziano quanto già detto, ovvero una bassa variazione su scala annuale dell'umidità relativa, ma con variabilità piuttosto alta a livello mensile soprattutto nei mesi invernali (dicembre, gennaio e febbraio), come è evidenziato dalle deviazioni standard piuttosto elevate. La variabilità è invece molto inferiore nei mesi estivi, soprattutto a luglio 2022, probabilmente per la particolarità di questa stagione nell'anno corrente caratterizzata, in-

fatti, da mancanza di piogge, temperature elevate e umidità relativa esterna molto bassa (media mensile nella zona di Narni pari al 33,5% come ricavato dal portale: <https://www.ilmeteo.it/portale/archivio-meteo/Narni/2022/Luglio>).

Le temperature mostrano valori piuttosto bassi nel periodo invernale (da dicembre 2021 a marzo 2022), come già detto in precedenza sulla base del grafico annuale. La maggiore variabilità dei valori di temperatura si riscontra nei mesi di marzo e maggio 2022, mentre la minore si ha nei mesi estivi, compreso settembre,

probabilmente per effetto del climatizzatore che rende più stabile tale parametro.

5. Conclusioni

I risultati del monitoraggio microclimatico nella Sala del Ghirlandaio della Pinacoteca di Palazzo Erolì a Narni hanno fornito dati di umidità relativa e temperatura su un arco annuale definendo così il clima storico al quale i due importanti dipinti su tavola attribuiti a Domenico Ghirlandaio e Benozzo Gozzoli si sono acclimatati. Anche se i dati non rientrano generalmente all'interno dell'area di benessere definita dalla UNI 10829 e dal Decreto Ministeriale n. 238 del 2001, si è visto che non si creano mai condizioni dei due parametri ambientali tali da favorire lo sviluppo di biodeterioramento. Il confronto con i dati registrati nell'adiacente sala didattica hanno messo in evidenza che il microclima all'interno degli ambienti del museo è influenzato in modo principale dal clima esterno che quindi determina sia gli andamenti stagionali sia alcune variazioni consistenti che sono state riscontrate soprattutto nei mesi invernali e primaverili in entrambi gli spazi.

Un altro dato rilevante emerso dal monitoraggio microclimatico riguarda i valori della temperatura che in estate sono tenuti sotto controllo dall'impianto di climatizzazione mentre in primavera, autunno e inverno variano molto anche in accordo con le variazioni stagionali, raggiungendo, nella stagione più fredda, valori

molto bassi, anche al di sotto di 10 °C, creando un ambiente non favorevole al visitatore anche se non particolarmente problematico per le opere d'arte. Nella sala didattica, dove non è attivo un impianto di climatizzazione, nei mesi estivi le temperature raggiungono valori piuttosto elevati, in accordo con quelli esterni desunti dalla centralina meteo più vicina a Narni.

I valori di umidità relativa si sono rivelati più stabili su scala annuale, ma molto meno su scala mensile con ampie variazioni soprattutto in inverno. Se da un lato queste variazioni non creano particolari problemi per i visitatori, dall'altro presentano invece un rischio per i dipinti su tavola in quanto possono innescare variazioni dimensionali del legno con conseguenti deformazioni e microfessurazioni che andranno ad incidere anche sulla stabilità della pellicola pittorica. I dati ottenuti dal monitoraggio termoisometrico devono costituire un punto di partenza per intraprendere una riflessione su eventuali sistemi da adottare per prevenire il degrado dei manufatti all'interno degli ambienti del Museo e nello stesso tempo per garantire il benessere dei visitatori, come raccomandato dal Decreto Ministeriale n. 238.

Sicuramente alcuni semplici accorgimenti e soluzioni tecniche (chiusura automatica delle porte e sistema di deumidificazione nella Sala del Ghirlandaio, climatizzatore nella sala didattica da attivare nei mesi più caldi) potranno migliorare il microclima all'interno dei due ambienti favorendo una buona conservazione delle opere e il benessere del visitatore.

Bibliografia

1. Stolow, N. *Conservation standards for works of art in transit and on exhibition*; UNESCO: Parigi, **1979**.
2. De Guichen, G. *Climate in Museums Measurement*; ICCROM: Rome, **1984**.
3. Bernardi, A. *Conservare opere d'arte. Il microclima negli ambienti museali*; Il Prato: Padova, **2003**.
4. Camuffo, D. (Ed.); Fassina, V. (Ed.); Havermans, J. (Ed.). *Basic Environmental Mechanisms. Affecting Cultural Heritage*; Nardini Editore: Firenze, **2010**.
5. Luciani, A.; Del Curto, D. *Monitorare il microclima negli edifici storici. Una pratica preventiva come strumento di conoscenza*; in: Pensare la prevenzione, Atti del Convegno di Studi, Bressanone, 13-16 luglio 2010, a cura di G. Biscontin e G. Driussi, Arcadia Ricerche: Venezia, **2010**, pp. 203-212.
6. Cosenza, R.; Pelosi, C. *La prevenzione nell'arte contemporanea. Ferro bifrontale arancione e plastico in ferro di Pietro Consagra*; in: Pensare la prevenzione, Atti del Convegno di Studi, Bressanone, 13-16 luglio 2010, a cura di G. Biscontin e G. Driussi, Arcadia Ricerche: Venezia, **2010**, pp. 301-309.
7. Salvo, M.; Lo Monaco, A.; Marabelli, M.; Pelosi, C. *I Beni demotnoantropologici. Problemi di Conservazione*; Edifir: Firenze, **2005**.
8. Ministero per i Beni e le Attività Culturali, D. M. 10 maggio 2001 Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei. (G.U. n. 244 – Serie generale, S. O. n. 238), 19 ottobre **2001**.
9. Fabbri, K. Historic Climate in Heritage Building and Standard 15757: Proposal for a Common Nomenclature. *Climate* **2022**, vol. 10 no. 4, pp. 1-9.
10. Schito, E.; Conti, P.; Urbanucci, L.; Testi, D. Multi-objective optimization of HVAC control in museum environment for artwork preservation, visitors' thermal comfort and energy efficiency. *Building and Environment* **2020**, vol. 180 article no. 107018.
11. Pelosi, C. *Il controllo del microclima negli ambienti confinati. Con quali strumenti?*; in: In viaggio con le muse. Spazi e modelli del museo, a cura di M. C. Mazzi; Edifir: Firenze, **2005**, pp. 309-310.
12. Lanteri, L.; Pelosi, C.; Lo Monaco, A. The relevance of monitoring the microclimate in museums. The case of Colle del Duomo in Viterbo. *European Journal of Science and Theology* **2020**, vol. 16 no. 4, pp. 181-191.
13. Pangallo, D.; Simonovicová, A.; Chovanová, K.; Ferienc, P. Wooden art objects and the museum environment: identification and biodegradative characteristics of isolated microflora. *Letters in Applied Microbiology* **2007**, vol. 45 no. 1, pp. 87-94.
14. Pournou, A. *Biodeterioration of Wooden Cultural Heritage*; Springer Cham: Switzerland AG, **2020**.
15. Konsa, K.; Tirrul, I.; Hermann, A. Wooden objects in museums: Managing biodeterioration situation. *International Biodeterioration & Biodegradation* **2014**, vol. 86 Part. B, pp. 165-170.

16. Lo Monaco, A.; Giagnacovo, C.; Falcucci, C.; Pelosi, C. The triptych of the Holy Saviour in the Tivoli Cathedral: diagnosis, conservation and religious requirements. *European Journal of Science and Theology* **2015**, vol. 11 no. 2, pp. 73-84.
17. Lo Monaco, A.; Balletti, F.; Pelosi, C. Wood in cultural Heritage. Properties and conservation of historical wooden artefacts. *European Journal of Science and Theology* **2018**, vol. 14 no. 2, pp. 161-171.
18. Avanzati, D.; Saccuman, R.; Agresti, G.; Faieta, R.; Caliano, E.; Pelosi, C.; Lo Monaco, A. Multidisciplinary approach for the conservation of the Casoli triptych. *European Journal of Science and Theology* **2020**, vol. 16 no. 1, pp. 207-216.
19. Camuffo, D.; Bernardi, A.; Sturaro, G.; Valentino, A. The microclimate inside the Pollaiuolo and Botticelli rooms in the Uffizi Gallery, Florence. *Journal of Cultural Heritage* **2002**, vol. 3, pp. 155-161.
20. Camuffo, D.; Bernardi, A.; Pagan, E.; Beccherini, F. The impact of heating, lighting and people in re-using historical buildings: a case study. *Journal of Cultural Heritage* **2004**, vol. 5, pp. 409-416.
21. Lo Monaco, A.; Marabelli, M.; Pelosi, C.; Salvo, M. The Altar Machine in the Church Mother of Gangi (Palermo, Italy). Interpretation of the past uses, scientific investigation and preservation challenge. *Chemistry Central Journal* **2012**, vol. 6 no. 47, pp. 1-11.
22. Tornari, V.; Basset, T.; Andrianakis, M.; Kosma, K. Impact of Relative Humidity on Wood Sample: A Climate Chamber Experimental Simulation Monitored by Digital Holographic Speckle Pattern Interferometry. *Journal of Imaging* **2019**, vol. 5 no. 65, pp. 1-19.
23. Luimes, R.A.; Suiker, A.S.J. Numerical modelling of climate-induced fracture and deformation in wood: Application to historical museum objects. *International Journal of Solids and Structures* **2021**, vols. 210-211, pp. 237-254.

Conclusione

I nuovi obiettivi di salubrità degli spazi confinati e i progressi nel campo scientifico, hanno permesso l'evolversi nel tempo del concetto di comfort indoor avviando una dimensione globale dell'edificio esito della relazione tra più fattori. Questo è un aspetto che i riferimenti normativi considerano da pochi anni definendo un calcolo articolato in grado di considerare anche parametri non misurabili mediante strumentazione. Nello specifico del patrimonio costruito, però, c'è ancora un divario, in quanto il quadro legislativo che regola il comfort degli ambienti interni non considera le specificità e le prestazioni in essere delle tipologie edilizie. Le procedure di valutazione del benessere

dell'ambiente interno sono allo stesso modo applicabili per tutti gli edifici: nuovi ed esistenti. Questo implica delle considerazioni a riguardo, tenendo presente i vincoli in essere del costruito e la legislazione in materia di tutela per gli edifici esistenti da più di settant'anni o di particolare pregio.

La questione è, invece, lievemente osservata nei più comuni sistemi di certificazione di sostenibilità degli edifici, i quali riservano particolari protocolli per la determinazione dei criteri in funzione se si tratti di edificio esistente o in costruzione o da costruire. Resta sempre un approccio univoco per le tipologie tradizionali, moderne, a struttura continua o intelaiata,

con sistemi costruttivi a secco o a umido, ecc., condizioni che, invece, incidono sensibilmente sugli esiti della valutazione e alle quali i metodi di indagine e gli obiettivi di sostenibilità dovrebbero essere rapportati e di conseguenza calibrati.

Sebbene la letteratura restituisca un ampio consenso sull'influenza che la qualità degli ambienti di vita può generare sul benessere delle persone, nella pratica, ancora l'utente non è coinvolto nella progettazione e poco nella gestione del suo ambiente di vita. Le certificazioni di sostenibilità, ad esempio, interessano aspetti soprattutto di natura ambientale (consumo di energia e risorse), riservando un'attenzione bassa alla dimensione sociale della sostenibilità e molto limitata al confronto con l'utenza.

Un altro aspetto da considerare è l'impossibilità di individuare strategie di azione comune nell'uso di prodotti a bio-based nell'edilizia, nonostante il progresso e il fermento della comunità scientifica sui benefici che tali prodotti apporterebbero per la qualità dell'aria negli ambienti confinati e in prospettiva di un'economia circolare delle risorse.

Una nota positiva è data dal Decreto interministeriale del 26 giugno 2015 che regola i Criteri Minimi Ambientali (CAM) dove viene data un'attenzione particolare ai materiali per le costruzioni il cui 15% del peso totale, relativo ad un'opera, deve essere realizzato con materia recuperata o riciclata. Tuttavia, se non vi è un'attenzione della legge adeguata alle sperimentazioni e alle realizzazioni con materiali di scarto naturali e di origine organica è notevole il ral-

lentamento di azioni economiche mirate all'applicazione di materie prime seconde, che seguano un percorso di controllo e certificazione unificato per il mercato edilizio.

Infine, è continuo il rimando sia nella legislazione che nei protocolli di certificazione all'efficienza dei sistemi HVAC senza contemplare i numerosi studi sugli effetti che questi generano sulla qualità dell'aria. Inoltre, per i sistemi passivi che, invece, garantirebbero elevate prestazioni di comfort interno riducendo allo stesso tempo la domanda di energia, non è presente una norma tecnica di riferimento. Soluzioni come le pareti verdi ventilate, ad esempio, sono dunque l'esito del progresso tecnologico ma non standardizzato e ciò può costituire un ostacolo per le amministrazioni o i professionisti nella scelta di sistemi adeguati ed effettivamente prestanti per uno specifico edificio.

Pertanto, per comprendere la rilevanza che le soluzioni passive apportano in termini di comfort e salubrità dell'ambiente interno, nonché l'incidenza sulla sostenibilità ambientale basta guardare al passato. La caratteristica principale delle architetture tradizionali è l'integrazione di elementi diversi di controllo ambientale che riescono a rispondere alle esigenze di benessere degli utenti. Questi elementi sono caratterizzati da istanze socioculturali e ad istanze estetico-formali che si correlano strettamente agli aspetti tecnici e strutturali, all'uso dei materiali, in genere locali e ad una cultura del costruire, frutto di antichi e sedimentati saperi. La riscoperta di tali sistemi, talvolta già presenti nel patrimonio costruito ma occultati dalle trasformazioni del tempo, o la loro riproposi-

zione in chiave contemporanea in interventi di retrofit degli edifici esistenti, può costituire la soluzione al miglioramento delle condizioni di benessere per l'utente in un ambiente interno.

Come nel passato, gli edifici, con semplici soluzioni, possono adattarsi al contesto climatico, soprattutto nei climi mediterranei, senza subire interventi invasivi dettati da un sovrautilizzo di sistemi impiantistici che ne deteriorerebbero le caratteristiche tipologiche, materiche e morfologiche fino ad alterare i valori percettivi-culturali associati allo specifico luogo. Il valore aggiunto nel confronto con il patrimonio edilizio esistente è interpretare le prestazioni in essere per poterle integrare senza intaccare i caratteri del costruito e le tecnologie di tipo passivo si prestano a farlo con un minimo e talvolta anche senza apporto impiantistico. La maggior parte dei sistemi passivi sono, infatti, reversibili, riconoscibili e garantiscono una minima invasività, risultando compatibili nella loro applicazione.

L'efficacia di soluzioni tecnologiche passive in interventi per il miglioramento delle condizioni di comfort indoor in edifici esistenti è dimostrata anche nei casi studio che il presente volume riporta.

Il monitoraggio microclimatico della Villa del Casale a Piazza Armerina, effettuato per la durata di un anno, ha verificato gli effetti che l'intervento di restauro, concluso nel 2012 con l'apposizione di una struttura con parete ventilata e camino di ventilazione in copertura, ha prodotto in termini di temperatura e umidità. I risultati dello studio hanno mostrato come l'intervento abbia influito positivamente sulle

condizioni microclimatiche, più idonee sia alla corretta conservazione del sito che ai visitatori, risolvendo la condizione più critica, legata all'effetto serra, soprattutto nel periodo estivo.

L'analisi sul mantenimento delle prestazioni di una parete verde anche in condizioni climatiche meteorologiche particolarmente ventose, piovose e soleggiate ha confermato l'efficacia della soluzione restituendo una migliore risposta alla temperatura esterna rispetto all'involucro senza parete verde in tutte le stagioni sia a sud che a ovest. Anche se il caso studio è localizzato in un contesto mediterraneo, il monitoraggio con un database di tre anni consente di analizzare gli effetti di capacità di termo regolazione passiva dell'involucro verde in diverse circostanze climatiche e, quindi, la positiva risposta potrebbe essere vagliata anche in contesti climatici differenti.

Il terzo caso studio che ripropone l'uso di una tecnica antica, come l'intonaco con cocciopesto, restituisce i dati di un monitoraggio annuale in risposta alla prestazione termometrica in un ambiente particolarmente umido. I risultati mostrano l'eliminazione del problema di umidità di risalita e di condensa interna con valori idonei a quelli standard della normativa vigente e con beneficio anche sui costi di manutenzione ordinaria dell'intonaco.

L'ultimo caso studio è un monitoraggio pre-intervento dei valori di umidità relativa e temperatura su un arco annuale nella Sala del Ghirlandaio della Pinacoteca di Palazzo Erolì a Narni e in una sala didattica adiacente, una con sistema di climatizzazione meccanico e l'altra senza. Nel museo non sono adottati sistemi pas-

sivi di raffrescamento, riscaldamento e ventilazione e l'impianto di climatizzazione meccanico si rivela inefficace. I dati registrati nelle due sale hanno messo in evidenza come il microclima all'interno degli ambienti del museo è influenzato in modo principale dal clima esterno in entrambi gli spazi. I dati ottenuti dal moni-

toraggio costituiscono un punto di partenza per intraprendere una riflessione sul recupero delle prestazioni in essere dell'edificio per prevenire il degrado dei manufatti all'interno degli ambienti del museo e nello stesso tempo per garantire il benessere dei visitatori.

Conclusions

The new goals of salubrity in indoor spaces, together with scientific progress, have led to the evolution of the concept of indoor comfort over time. This has allowed the comprehension of the global dimension of the building, as the result of the relationship between multiple factors. Legislative frameworks have started considering this aspect only in recent years, defining an articulate calculation to include non-instrumentally measurable parameters as well. However, for existing buildings there is still a gap, as the legislative framework on indoor comfort does not consider the specific characteristics and required performances for the different building typologies. Indoor comfort evaluation procedures are applied in the same way for all buildings: both newly built and existing ones. This requires specific considerations, examining the current constraints of the built environment and the legislation on the protection of particularly valuable buildings, and those built more than 70 years ago. This issue is considered, albeit slightly, by the

most common building sustainability certification systems, which have elaborated specific protocols for the evaluation of the criteria based on whether they are used on an existing or new building. However, it is still a univocal approach, to be used for traditional and modern typologies, load-bearing masonry or frame structure, dry or wet construction systems, etc.; however, these conditions sensibly affect the assessment results, and the investigation methods and sustainability goals should be appropriately related and calibrated on their base.

Though the scientific literature shows a wide agreement on the influence of indoor environmental quality on people's well-being, in practice users are not involved at all yet in the design processes – and scarcely involved in the management – of their living environments. Sustainability certifications, for example, are mainly related to environmental sustainability aspects (consumption of energy and resources), while little attention is given to the social dimension of sustainability, and even less to the dialogue with users.

Another aspect to consider is the impossibility to individuate shared action strategies for the use of bio-based in building constructions, despite the progress and the scientific interest in the benefits of these materials for indoor air quality, and for the circular economy of resources.

A good note is represented by the Interministerial Decree 26.06.2015, which establishes Minimum Environmental Criteria (CAM), with a particular focus on construction materials. In fact, it declares that 15% of the total weight of a building must be realized with recovered or recycled materials. However, there is no adequate law for experimentations and constructions with materials from natural and organic waste. This leads to a notable slowing down in the achievement of a unified control and certification process for economic actions involving the application of secondary raw materials, within the building market.

In fact, both legislative frameworks and certification protocols often recall HVAC system efficiency, without considering the several studies on their effect on air quality. Moreover, there is no reference technical code for passive systems, which would produce high indoor comfort, reducing energy demand at the same time. Ventilated green walls, for example, are a result of technological progress yet have not been standardized, thus possibly representing an obstacle for administrations and professionals in the choice of suitable and effectively performing systems for a specific building.

Moreover, past building solutions can support the comprehension of the relevance of passive

solutions in terms of indoor environmental comfort and salubrity, and impact on environmental sustainability. The main characteristic of traditional buildings is the integration of different elements for environmental control to fulfill users' well-being needs. These elements respond to socio-cultural and aesthetical-formal claims, which are directly related to technical and structural aspects, to the use of materials – which are often local – and to a building culture that derives from ancient and sedimented knowledge. The rediscovery of these systems, which are often already present in the built environment yet hidden by transformations over time, and their contemporary re-proposition in retrofit interventions on existing buildings, can represent an excellent solution for the improvement of users' well-being conditions in indoor environments.

As in the past, buildings can adapt to their climatic context with simple solutions, especially in Mediterranean climates, without receiving invasive interventions due to the overuse of technological systems that would damage their typological, material, and morphological characteristics to the point of altering the perceptive-cultural values of their specific localities. When operating on existing buildings, the added value can be represented by interpreting the current performances to integrate them without affecting the present characteristics. Passive technologies can accomplish that, with minimal or no technological support. In fact, most passive systems are reversible, recognizable, and guarantee minimum invasiveness, hence providing compatible applications.

The effectiveness of passive technological solutions in interventions for the improvement of indoor comfort conditions in existing buildings has also been proven in the case studies reported by this volume. The one-year-long microclimatic monitoring of Villa del Casale in Piazza Armerina has shown that the effects of the restoration interventions, concluded in 2021 with the addition of a structure with ventilated wall and a ventilation chimney on the roof, in terms of temperature and humidity. The results of the study have shown that the intervention has positively affected microclimatic conditions, making them more suitable both for the conservation of the site and for visitors, solving the most critical condition, related to the greenhouse effect, especially in the summer period.

The analysis of the conservation of the performance of a green wall also under particularly windy, rainy, and sunny weather, has confirmed the effectiveness of this solution, showing a better response to external temperature, compared to the envelope without the green wall, in all seasons, both on the South and on the West. Though the case study is set in a Mediterranean context, the 3-year-long database monitoring has allowed analyzing the effects of passive thermal regulation under various climatic circumstances; hence, a positive response could also be assumed in different climatic contexts.

The third case study re-proposes the use of an ancient technique, as opus signinum plaster, and presents the data of annual monitoring concerning the thermo-hygrometric performance in a particularly humid environment. The results show the elimination of the capillary humidity rise and internal condensation in compliance with the standard values of the current legislative framework and with benefits on the costs of routine maintenance of the plaster.

The last case study is a one-year monitoring of relative humidity and temperature values prior to the intervention in the Ghirlandaio of the Art Gallery of Erola Palace in Narni, and in an adjacent didactic room: the former has a mechanical air conditioning system, while the other one has not. The museum does not have passive systems for cooling, heating, and ventilation, and the mechanical air conditioning system results to be ineffective. The data recorded in the two rooms have highlighted that the indoor microclimate of the museum rooms is mainly influenced by the external climate, in both rooms. Monitoring data represent a starting point for a reflection on the restoration of the current performances of the building to prevent the decay of the artifacts in its indoor environments, and to guarantee the visitors' well-being.

Il presente volume è l'esito di una ricerca ad ampio raggio sull'applicazione dell'IEQ (Indoor Environmental Quality) nell'edilizia esistente. Si indagano i metodi di valutazione e gli standard relativi ai parametri ambientali in riferimento ai livelli di benessere necessari per garantire un'adeguata vivibilità degli ambienti interni; è analizzato lo stato dell'arte sugli aspetti tecnologici dell'architettura finalizzati all'ottenimento di un ambiente salubre e confortevole. Lo studio si incentra sui sistemi passivi di controllo microclimatico, anche riproponendo quelli più antichi che ancora oggi, rivisitati, si confermano efficaci soluzioni, in particolare per la capacità di integrarsi nell'edilizia esistente rispondendo, al tempo stesso, alle esigenze di benessere degli utenti. Lo scopo è interpretare le prestazioni in essere del costruito per poterle integrare senza intaccarne i caratteri fisici e percettivi. Il costruito, con semplici soluzioni tecnologiche, può adattarsi al contesto climatico, soprattutto nei climi mediterranei, senza un sovrautilizzo di sistemi impiantistici. L'efficacia delle soluzioni tecnologiche passive per il controllo microclimatico degli ambienti interni è dimostrata anche nei casi studio che il presente volume riporta. Si tratta di esempi significativi e modelli metodologici utili a configurare soluzioni reiterabili e adattabili in contesti simili.

This volume is the result of wide-scope research on the application of IEQ (Indoor Environmental Quality) in existing buildings. The examined items are the evaluation methods and standards related to the environmental parameters for the well-being levels required to guarantee suitable livability in indoor environments. An analysis is provided on the state of the art of technological aspects in architecture for the achievement of salubrious and comfortable indoor spaces. The study is focused on passive systems for microclimatic control, with a re-proposition of the most ancient ones. Nowadays, when revisited, they have proven to be effective solutions, especially due to their possibility to be integrated into existing buildings, fulfilling users' well-being needs. The purpose is to interpret the current performances of the built environment to integrate them without altering present physical and perceptive characteristics. The built environment can be adapted to the climatic context with simple technological solutions, especially in Mediterranean climates, without overusing HVAC systems. The effectiveness of passive technological solutions for microclimatic control in indoor environments has been also demonstrated in the case studies reported in this volume. They represent significant examples and methodological models, which can support the configuration of repeatable and adaptable solutions for similar contexts.