

ARCHITETTURA: INNOVAZIONE E PATRIMONIO

DOTTORATO DI RICERCA IN

XXX

CICLO DEL CORSO DI DOTTORATO

**Efficienza energetica e comfort termico negli edifici del patrimonio:
modelli di analisi del raffrescamento passivo da ventilazione naturale.**

Titolo della tesi

Valeria Vitale

Nome e Cognome del dottorando



firma

Ginevra Salerno

Docente Guida/Tutor: Prof.



firma

Elisabetta Pallottino

Coordinatore: Prof.

firma

Sommario

Abstract	5
Introduzione	6
1. Letteratura e stato dell'arte	9
1.1 Premessa	9
1.2 Ricerche sugli edifici storici	11
1.2.1 Metodo di analisi bibliografica.....	11
1.2.2 Storia e diffusione.....	12
1.2.3 Obiettivi e temi trattati.....	19
1.2.4 Età degli edifici.....	22
1.3 Tipi di edifici.....	23
1.3.1 Uso residenziale.....	24
1.3.2 Palazzi, uffici e luoghi di istruzione	30
1.3.3 Uso religioso.....	37
1.3.4 Musei, biblioteche e teatri	40
1.3.5 Spazi urbani	43
1.3.6 Siti archeologici.....	44
1.3.7 Altro	45
2. Raffrescamento passivo negli edifici del patrimonio	47
2.1 Inquadramento	47
2.2 Archetipi dell'area mediterranea.....	49
2.2.1 Cenni sul mediterraneo meridionale.....	49
2.2.2 Il caso italiano: dagli archetipi agli edifici storici	55
2.3 Strategie di raffrescamento passivo	64
2.3.1 Generalità sulla ventilazione naturale.....	65

2.3.2 Ventilazione e raffrescamento delle masse	67
3. Cenni sulle teorie del comfort termico	71
3.1 Cos'è il comfort?	71
3.2 Basi ed evoluzione delle teorie del comfort.....	74
3.2 Modello di Fanger.....	75
3.3 Modello Adattivo	77
3.3.1 Comfort estivo in climi umidi	80
4. Modelli fisico-matematici	82
4.1 Premessa	82
4.2 Modelli multi-zona	84
4.2.1 Generalità	84
4.2.2 Ipotesi semplificative.....	84
4.2.2 Equazioni di bilancio energetico	86
4.2.3 Conduzione attraverso le pareti	90
4.2.4 Considerazioni finali sui modelli multi-zona	94
4.3 Modelli CFD.....	96
4.3.1 Generalità	96
4.3.2 Equazioni della termo-fluido dinamica	97
4.3.2 Considerazioni sul sistema di equazioni.....	110
4.3.3 Forze di galleggiamento	112
4.3.5 Scambi radiativi.....	114
4.3.6 Considerazioni finali sui modelli CFD.....	119
4.4 Aspetti riguardanti la modellazione numerica	120
4.4.1 Software CFD utilizzato nella tesi.....	120
4.4.2 Studio preliminare su di un caso semplificato.....	121
5. Un caso di studio.....	127
5.1 Premessa	127

5.1 Descrizione dell'edificio	128
5.2 Descrizione dei modelli	131
5.2.1 Semplificazione 2D e proprietà termo-fisiche.....	131
5.2.2 Equazioni di campo	134
5.2.3 Flusso laminare vs turbolento.....	136
5.2.4 Condizioni al bordo	138
5.2.5 Simulazioni e profili d'uso	145
5.2.6 Algoritmi di integrazione, tolleranze numeriche e controllo dell'errore	147
5.3 Risultati numerici.....	151
5.3.1 Campi di temperature e velocità.....	151
5.3.2 Temperature operative e range di comfort.....	154
5.3.1 Commento dei risultati	160
Conclusioni.....	161
Bibliografia	163

Abstract

In tempi recenti, la questione dell'efficienza energetica e del comfort termico negli edifici storici è diventata un argomento di rilevante interesse in ambito accademico.

In relazione a recenti politiche internazionali che affrontano il problema del consumo energetico e delle emissioni in atmosfera, di cui un'ingente percentuale è dovuta al settore edilizio, si riscontra una sempre più attiva ricerca che ha come oggetto di studio il patrimonio esistente.

L'adeguamento degli edifici esistenti agli attuali standard in termini di efficienza e comfort termico ha generalmente come obiettivo principale il miglioramento delle performance e la riduzione del consumo energetico e dei costi di gestione. Tale tema diventa una questione spinosa quando l'oggetto studiato ha un particolare interesse dal punto di vista storico-culturale, ovvero quando la richiesta dell'adeguamento ai nuovi standard può potenzialmente entrare in conflitto con la tutela e la conservazione del patrimonio stesso.

In tale ottica, un filone della ricerca europeo, ma in particolar modo italiano, pone l'attenzione sullo studio e la comprensione dei valori storico-culturali di tali beni, con principale attenzione alle cosiddette strategie "passive" (vale a dire senza l'utilizzo di impianti di condizionamento), che hanno permesso a lungo una godibile fruizione di questi edifici [1].

Tali strategie, che hanno come obiettivo principale il mantenimento del comfort durante la stagione estiva, sono spesso basate sull'utilizzo della ventilazione naturale combinata al raffrescamento degli elementi massivi costituenti la struttura dell'edificio.

Ai fini di valutarne l'efficienza, fino agli anni '70 del secolo scorso gli strumenti a disposizione erano la galleria del vento e la camera climatica, ovvero metodi sperimentali per la valutazione delle risposte degli edifici, in scala reale o ridotta, alle sollecitazioni esterne relative ai moti dell'aria e alle differenze di temperatura. In anni recenti, lo sviluppo di sistemi di analisi basati sull'impiego del computer ed il parallelo incremento della capacità e velocità di calcolo hanno permesso la generazione di modelli di simulazione e di algoritmi numerici ai fini della predizione dei flussi d'aria e della distribuzione delle temperature interne. Questi software [2] si stanno lentamente affermando nel settore della progettazione architettonica ed energetica degli edifici, talvolta affiancandosi alle prove in camera climatica e galleria del vento, talvolta rimpiazzandole, come ampiamente dimostrato in letteratura [3] [4] [5].

Il presente lavoro vuole porre l'attenzione sulle potenzialità della CFD (*Computational Fluid Dynamic*) come strumento di analisi del raffrescamento passivo da ventilazione naturale degli edifici del patrimonio italiano, al fine di poterne valutare l'efficacia in termini di comfort ed efficienza energetica e permettere di trasmettere alle future generazioni il bene ed i suoi valori.

Introduzione

In area mediterranea si sono storicamente tramandati sistemi di raffrescamento passivo che sfruttano determinate condizioni ambientali e microclimatiche al fine di garantire il comfort in fase estiva [6] [7]. In Italia, in particolare, si sono affermati principalmente strategie che sfruttano l'utilizzo di masse termiche combinate alla ventilazione naturale.

A partire della seconda metà del secolo scorso, una nuova tendenza culturale globalmente diffusa ha portato ad un radicale allontanamento da quelle che erano le tecniche costruttive tradizionali locali.

Lo sviluppo e la diffusione di pareti leggere, che ha permesso di ridurre tempi e costi di costruzione, associata alla trasparenza delle stesse, con l'uso di vetrate sempre più grandi, ha portato alla perdita dell'eredità delle intelligenti modalità costruttive del passato, sostituendola con un'impiantistica assai più invasiva e costosa, che ha illuso i progettisti di potersi affrancare dalle condizioni climatiche locali, ma ha di fatto lasciato gli utenti in balia delle variazioni climatiche giornaliere e stagionali.

“La casa degli umani si trasforma. La nostra casa, oggi, non è più quella di trent’anni fa. Le ragioni? Ragioni tecniche, ragioni economiche. Escluderei affatto le ragioni morali.” [8]. Con queste parole Carlo Emilio Gadda, famoso scrittore e ingegnere italiano, commenta le trasformazioni degli edifici indotte dall’uso del telaio in cemento armato. Proprio in relazione alla perdita della “pesantezza” delle pareti murarie, egli continua come segue: *“Il muro di mattoni vuoti, o “forati” che dir si vogliano, viene a difettare di “massa” e però di inerzia. Il più comune tramestio, un urto, una percussione si ripercuote ne’ pavimenti soffitti e nelle travature e pilastri, l'alzata o la scesa delle tapparelle avvolgibili del terzo piano fa traballare tutta la parete fino al settimo. Ma, sopra ogni cosa, lo svantaggio termico: le stanze si raffreddano e si riscaldano al variare della temperatura esterna con le ore del giorno (...). Terzo e principe, lo svantaggio acustico. La casa ci accoglie anche per il necessario, per il vivificante riposo (...)*” [8].

Nella valutazione delle strategie passive, basate sulla ventilazione naturale e sul raffrescamento dell’involucro o delle masse interne ad esso, risulta necessaria un’analisi accurata volta alla stima della risposta dinamica e, quindi, inerziale degli edifici.

A tal proposito risulta interessante indagare il rapporto tra l’uso di modelli fisico-matematici semplificati, attualmente diffusi ma fortemente limitati, e l’utilizzo invece di modelli numerici agli elementi finiti, che risolvono le equazioni della termo-fluidodinamica e restituiscono una risposta dettagliata seppur complessa dal punto di vista scientifico e computazionale.

Parallelamente all'indagine sugli aspetti teorico-scientifici, il fine della ricerca è quello di applicare lo studio ad un edificio del patrimonio dell'area mediterranea, in particolar modo italiano, fornendo una metodologia di analisi volta a stimare gli effetti delle strategie di raffrescamento passivo da ventilazione naturale in termini di comfort termico ed efficienza energetica.

La tesi è articolata nei seguenti sei capitoli:

- Letteratura e stato dell'arte;
- Raffrescamento passivo in clima mediterraneo;
- Cenni sulle teorie del comfort termico;
- Modelli fisico-matematici;
- Un caso di studio;
- Conclusioni.

Il testo che segue è incentrato sullo studio dell'efficienza energetica e del comfort degli edifici del patrimonio architettonico, una ben precisa categoria degli edifici esistenti che merita una definizione ed un inquadramento.

Il concetto di patrimonio e di vincolo storico-relazionale viene introdotto e definito dall'art. 2 della legge 1089 del 1939: *“Sono altresì sottoposte alla presente legge le cose immobili che, a causa del loro riferimento con la storia politica, militare, della letteratura, dell'arte e della cultura in genere, siano state riconosciute di interesse particolarmente importante e come tali abbiano formato oggetto di notificazione, in forma amministrativa, del Ministro della pubblica istruzione.”*

Tale concetto viene ampliato da una serie di normative dal 2004 in poi [9] [10] [11], con le quali la definizione prende l'attuale forma, riportata di seguito: *“le cose immobili e mobili, a chiunque appartenenti, che rivestono un interesse particolarmente importante a causa del loro riferimento con la storia politica, militare, della letteratura, dell'arte, della scienza, della tecnica, dell'industria e della cultura in genere, ovvero quali testimonianze dell'identità e della storia delle istituzioni pubbliche, collettive o religiose”*.

Inoltre, si ritiene opportuno far riferimento ai concetti espressi dalla Direzione Generale Belle Arti e Paesaggio nel Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio [12], e alla nuova concezione a seguito degli atti del 1964 [13] e successivi: *“Come la nozione di bene culturale si è venuta evolvendo da quella di "cosa d'arte" o di "antichità e belle arti", così quella di bene*

architettonico¹ si è venuta evolvendo da quella di "monumento"; con questa parola (dal latino monere, ammonire, ricordare, ammaestrare) si attribuiva valore alle emergenze architettoniche rilevanti per i riferimenti artistici e/o storici."

Nel tempo, al concetto di monumento si sono affiancate nuove categorie di beni costituenti il patrimonio architettonico, tra le quale l'architettura minore, l'architettura rurale, la categoria dei centri storici, ovvero le *"strutture insediative urbane che costituiscono unità culturale o la parte originaria e autentica di insediamenti"*, le aree verdi (come parchi pubblici, chiostri, cortili, etc., sempre se caratterizzati da rilevanza artistica o storica) ed i siti archeologici.

Ai fini dello studio condotto nel Cap.1, in cui si fornisce un inquadramento dello stato dell'arte sugli studi condotti sugli aspetti energetici degli edifici del patrimonio, si è deciso di utilizzare come anno "spartiacque" il 1945, come avvalorato da alcune recenti definizioni di enti di certificazione energetica² ed alcuni studi del settore [14] [15].

Di qui in avanti la parola edificio storico o edificio del patrimonio sarà utilizzata nell'accezione definita sopra.

¹ *"Il termine bene architettonico sostituisce, nel corso degli anni, il termine monumento nella denominazione degli uffici territoriali: 1897 è istituita la "Soprintendenza speciale ai Monumenti" di Ravenna; 1907 (L. 386/1907) sono istituite, sul territorio nazionale, altre 18 "Soprintendenze ai Monumenti"; 1974, con la nascita del Ministero per i beni culturali e ambientali, sono istituite le "Soprintendenze ai beni ambientali e architettonici"; 1998 sono istituite le "Soprintendenze per i beni architettonici e per il paesaggio". [12]*

² *Ad esempio, il Green Building Council Italia ha fornito la definizione di edifici storici come quelli "che costituiscono 'testimonianza materiale avente valore di civiltà'. Inoltre: "ai fini dell'applicazione del protocollo GBC HB (un protocollo di certificazione volontaria del livello di sostenibilità degli interventi di conservazione, riqualificazione, recupero e integrazione di edifici storici con diverse destinazioni d'uso), l'edificio deve essere stato costruito prima del 1945 per una porzione ad almeno il 50% degli elementi tecnici esistenti." [388]*

1. Letteratura e stato dell'arte

1.1 Premessa

La dipendenza e l'utilizzo di energia a livello globale ha raggiunto livelli allarmanti, facendo emergere problemi relativi all'impatto ambientale (cambiamenti climatici, surriscaldamento locale, etc) e all'esaurimento delle risorse.

Il settore dell'edilizia, residenziale e commerciale, rappresenta una fetta considerevole al punto da attribuirle più del 30% delle emissioni di gas serra e il 40% circa del consumo energetico globale [16]. Considerando inoltre la maggior richiesta energetica e l'aumento delle aspettative in termini di comfort da parte degli utenti, insieme anche al sempre più lungo tempo che viene mediamente trascorso all'interno degli edifici, si capisce che tale trend di aumento di richiesta energetica si manterrà in futuro.

Per questo motivo, il problema dell'efficienza energetica degli edifici è divenuto negli ultimi anni uno dei principali obiettivi delle politiche energetiche locali, nazionali e internazionali.

In particolare, l'Unione Europea ha sviluppato nel tempo differenti strategie:

- la direttiva SAVE [17], intesa a limitare le emissioni di biossido di carbonio migliorando l'efficienza energetica, in cui si inizia a parlare di certificazione energetica, controllo dei consumi ed isolamento termico dei nuovi edifici;
- la direttiva 2002/91/CE [18] sulla performance degli edifici, che richiede agli Stati membri di promuovere il miglioramento del rendimento energetico degli edifici di nuova costruzione o edifici esistenti soggetti a importanti ristrutturazioni, in rispetto delle condizioni locali e climatiche esterne, adottando precise metodologie (Attestato di Certificazione Energetica messo a disposizione in fase di costruzione, compravendita o locazione). Tale direttiva viene successivamente modificata dalla 2010/31/CE [19], che sostituisce l'Attestato di Certificazione Energetica con l'Attestato di Prestazione Energetica, il quale consente di determinare anche i margini di miglioramento della performance energetica degli edifici e dove intervenire per aumentarne il risparmio energetico;
- la strategia Europa 2020 [20] all'interno del programma Horizon 2020, all'interno della quale viene proposta una politica energetica con l'obiettivo di ridurre le emissioni del 20% rispetto ai livelli del 1990, ricavare il 20% del fabbisogno di energia da fonti rinnovabili ed aumentare del 20% l'efficienza energetica.
- la comunicazione Europea "Energia pulita per tutti gli europei" (COM/2016/0860) [21]

che presenta un pacchetto di proposte al fine di allineare la legislazione dell'UE in materia di energia ai nuovi obiettivi energetici e climatici previsti per il 2030 e di contribuire agli obiettivi dell'Unione dell'energia 2015 (COM/2015/0080), con la quale la Commissione propone un obiettivo ambizioso del 30 % in materia di efficienza energetica entro il 2030.

Parallelamente allo sviluppo di politiche volte alla riduzione dei consumi degli edifici esistenti, negli ultimi anni si è iniziato a diffondere in ambito internazionale un nuovo interesse sul tema della preservazione del patrimonio culturale a fronte dei cambiamenti climatici.

In particolare, a valle del Workshop internazionale “*Climate Change and Cultural Heritage*” svoltosi a Ravello nel 2009, la Commissione Europea ha fondato un progetto importante su questo tema intitolato “*Climate for Culture*”, con particolare attenzione volta alle strategie di conservazione degli edifici del patrimonio storico esistente [22]. All'interno di questo progetto sono stati esaminati 74 casi studio del patrimonio storico Europeo e Nordafricano, con l'intento di sviluppare conoscenze sulle interazioni di causa ed effetto tra utilizzo, condizioni climatiche esterne ed interne, caratteristiche tecnologiche e stato di conservazione delle più diffuse tipologie degli edifici del patrimonio storico in differenti aree climatiche.

Ad oggi, nel 2017, anche le politiche climatiche si stanno indirizzando in tal senso, in particolare dopo la pubblicazione del *5th Assessment Report* del gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), che per la prima volta menziona l'esigenza di preservare il patrimonio culturale nelle politiche di adattamento climatico [23], e dopo la recente conferenza sul clima di Parigi *COP 21* del 2015.

A fronte di questi ultimi eventi, si auspica un interesse sempre crescente sull'interazione tra condizioni climatiche ed edifici del patrimonio storico esistente, non solo in termini prestazionali e di risparmio energetico ma anche di tutela, preservazione e conservazione.

1.2 Ricerche sugli edifici storici

1.2.1 Metodo di analisi bibliografica

Di seguito viene proposto un lavoro di ricerca bibliografica sullo stato dell'arte degli studi condotti sugli aspetti energetici degli edifici storici. Viene seguito il metodo di catalogazione utilizzato in una *review* di Martínez-Molina et al. [24], datata 2013, che analizza articoli pubblicati in varie riviste del settore.

In tale contesto, i paragrafi che seguono sono stati una rielaborazione, implementazione e soprattutto un aggiornamento ad oggi della *review* a cui si fa riferimento, andando ad inserire gli articoli pubblicati dal 2014 a giugno 2017, periodo che ha visto un ingente incremento in quanto a numero e varietà di ricerche sul tema.

I lavori citati nei paragrafi successivi soddisfano i seguenti criteri di selezione: sono articoli pubblicati su riviste scientifiche del settore e sono scritti in lingua inglese, in quanto considerati di rilievo in contesto internazionale.

In particolare, gli articoli a cui si fa riferimento sono stati selezionati con il seguente metodo: ricerca sul database Elsevier ScienceDirect³ utilizzando la combinazione di una o più delle parole chiave *historical/heritage/old building, energy, thermography, performance, natural ventilation, passive strategies, retrofit/rehabilitation/refurbishment/renovation, monitoring, indoor comfort* presenti nel titolo o nell'abstract di articoli su riviste o su atti di convegno del settore energia⁴ e sulla rivista dedicata al patrimonio *Journal of cultural heritage*. Successivamente, dall'insieme di articoli così selezionato, è stato estratto tramite lettura diretta il sottoinsieme dei lavori realmente pertinenti che assommano a 296 articoli pubblicati su riviste internazionali o su atti di convegno.

Oltre a comparare differenti metodi e tecniche di analisi del patrimonio utilizzate in tutto il

³ <https://www.sciencedirect.com/>

⁴ *Energy Procedia, Energy and Buildings, Building and Environment, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Renewable Energy, Habitat International, Procedia Engineering, Procedia - Social and Behavioral Sciences, International Journal of Sustainable Build Environment, Atmospheric Environment, Alexandria Engineering Journal, Applied Energy, International Journal of Ventilation, Journal of Environmental Management, Solar Energy, Procedia Environmental Sciences, Sustainable Cities and Society, Energy Conversion and Management, HBRC Journal, International Journal of Ambient Energy, The Science of the Total Environment, WIT Transactions on Ecology and the Environment, International Conference, Procedia Chemistry.*

mondo, l'obiettivo della rassegna è quello di fornire uno stato dell'arte ragionevolmente aggiornato ed approfondito nel quale questa tesi si inserisce.

Un altro aspetto importante è dato dall'evidenza del fatto che l'Italia, particolarmente nell'ultimo decennio, ha assunto in maniera sempre più determinata il ruolo di capofila nella ricerca in tale ambito, riportando un crescente numero di pubblicazioni e gruppi accademici che lavorano in questo settore.

1.2.2 Storia e diffusione

I primi studi e pubblicazioni trattanti gli aspetti energetici degli edifici storici iniziano ad emergere a cavallo tra gli anni '70 e '80.

La Figura 1.1 mostra il numero delle ricerche pubblicate nel mondo dal 1978 al 2017 a confronto con il PIL (Prodotto Interno Lordo pro capite) di alcune potenze internazionali. Per prima cosa si nota un generale incremento delle pubblicazioni nel tempo, con una crescita esponenziale dal 2011 ad oggi.

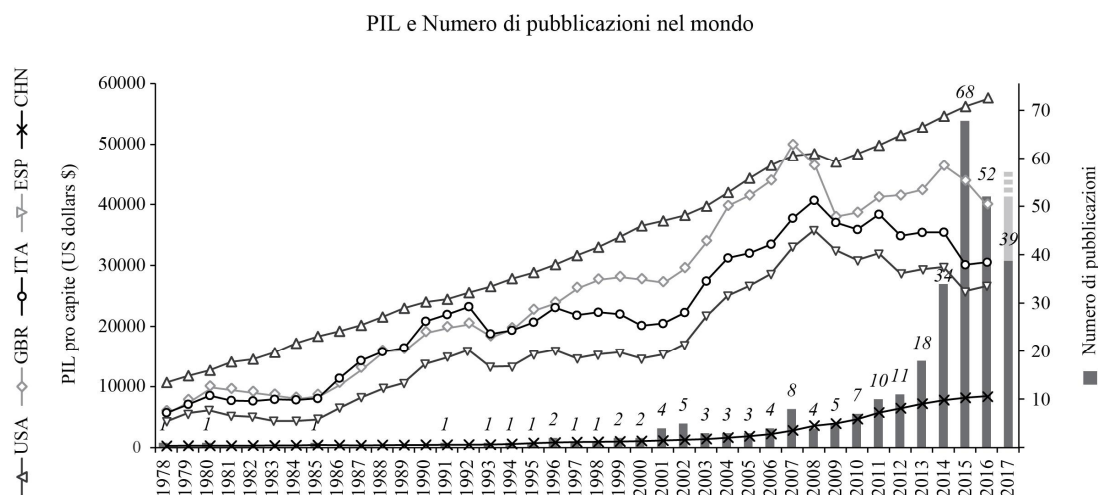


Fig. 1.1: Numero di pubblicazioni sull'efficienza energetica e comfort termico degli edifici storici nel mondo e PIL pro capite di varie potenze internazionali, dal 1978 al 2017.

In secondo luogo, se da una parte il PIL di Usa e Cina ha avuto un incremento pressoché costante, può essere invece riscontrata un'interessante correlazione tra numero di pubblicazioni e PIL delle Nazioni europee: nei momenti di crescita economica sembra venir meno l'interesse verso il patrimonio storico, mentre il numero delle pubblicazioni aumenta durante i periodi di

crisi.

Infatti le prime ricerche selezionate, che datano 1978, avvengono non a caso dopo la grande crisi petrolifera del 1973 e quella del 1979, eventi che portano alla diffusione delle prime politiche incentrate sul risparmio energetico e sulla riduzione della domanda di energia.

Ne consegue che le ricerche di questo periodo si focalizzano in gran parte sulla riduzione dei consumi energetici mediante il miglioramento dell'isolamento termico dell'involucro e sulla ricerca di tecnologie ed approcci progettuali finalizzati alla riqualificazione energetica mediante sistemi passivi [25] [26] [27].

A seguito del miglioramento delle condizioni economiche e dell'orientamento delle ricerche sulle nuove costruzioni e sulle innovazioni, l'interesse verso degli aspetti energetici degli edifici storici vede un periodo di stagnazione, con un esiguo numero di articoli pubblicati tra il 1985 e il 1998.

A seguito di questo intervallo, dal 1999 al 2010 si vede la rinascita dell'interesse in questo campo, con studi che implementano nuovi sistemi di monitoraggio ai fini della conservazione degli edifici [28] [29] [30]. Inoltre, in questi anni inizia a diffondersi un nuovo filone focalizzato sulla conservazione delle opere d'arte all'interno degli edifici storici, migliorando le condizioni termo-igrometriche interne e al tempo stesso preservando il valore storico degli edifici stessi [31] [32] [33] [34] [35] [36] [37] [38]. Molte delle pubblicazioni di questo periodo iniziano a sperimentare nuove metodologie di analisi applicate allo studio del patrimonio, come la CFD⁵ ai fini di determinare il comportamento passivo e le performance termo-igrometriche degli edifici, a volte accoppiata a campagne di monitoraggio [39] [40] [41] [42].

Ad oggi, a seguito della forte recessione derivata dalla crisi finanziaria del 2007, il volume di pubblicazioni è significativamente aumentato e, specialmente a partire dal 2011, si incrementa di anno in anno. In questo periodo si sono diffusi nuovi progetti di ricerca con prospettive economiche, come ad esempio quelli che implementano test sul ciclo di vita dei materiali (LCA-Life Cycle Assessment) [43].

In tale contesto, lo studio del patrimonio in termini di performance e comfort si sta diversificando sempre più in termini di contenuti e tipologia di edifici analizzati, applicando diverse metodologie a varie scale, dalla scala del singolo ambiente fino alla scala urbana [44] [45]. Molti di questi studi si focalizzano sulla riqualificazione degli edifici del patrimonio storico, con l'obiettivo di promuovere l'efficientamento energetico rispettando al tempo stesso i valori storici degli edifici.

⁵ *Computational Fluid Dynamics*

In relazione alla correlazione tra diffusione delle ricerche e andamento del PIL precedentemente citata, merita una nota di riguardo un ulteriore approfondimento, al fine di avvalorare tale tesi. Le figure di seguito proposte riportano ciascuna l'andamento del PIL di una Nazione distintasi per quantità di ricerche condotte su questo tema; riportano inoltre il numero di pubblicazioni redatte da autori appartenenti alle Istituzioni della Nazione stessa ed il numero di pubblicazioni con oggetto casi studio appartenenti al suo patrimonio storico.



Fig. 1.2: PIL pro capite italiano, numero di pubblicazioni redatte da autori di Istituzioni italiane e numero di pubblicazioni con oggetto casi studio del patrimonio italiano.

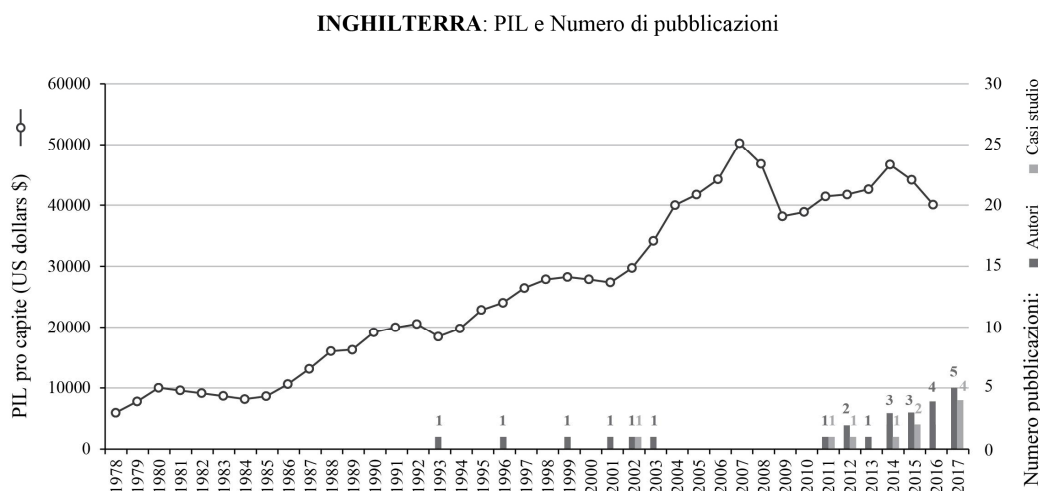


Fig. 1.3: PIL pro capite inglese, numero di pubblicazioni redatte da autori di Istituzioni inglesi e numero di pubblicazioni con oggetto casi studio del patrimonio inglese.

SPAGNA: PIL e Numero di pubblicazioni

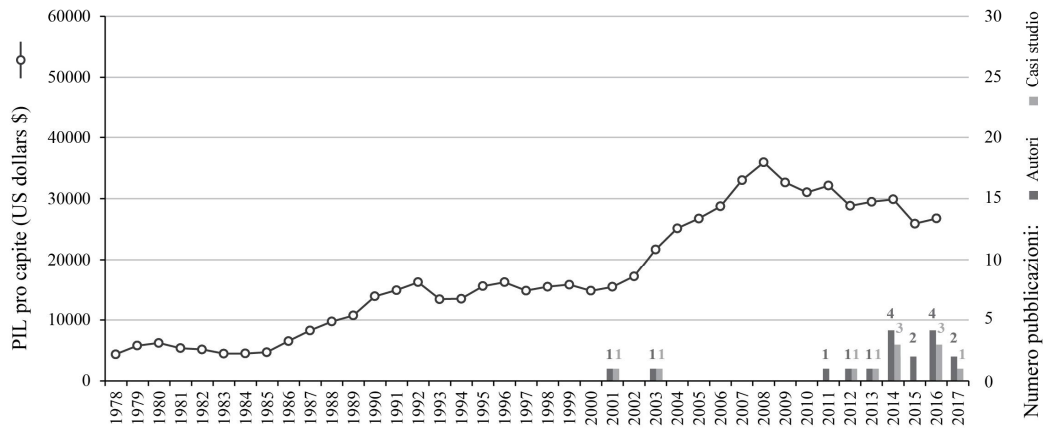


Fig. 1.4: PIL pro capite spagnolo, numero di pubblicazioni redatte da autori di Istituzioni spagnolo e numero di pubblicazioni con oggetto casi studio del patrimonio spagnolo.

Le Figure 1.2 (Italia), 1.3 (Inghilterra) e 1.4 (Spagna) mostrano l'andamento PIL/pubblicazioni in tre Nazioni europee attive su questo tema di ricerca. Come prima considerazione, si nota immediatamente che l'Italia ha un'attività di ricerca molto intensa, probabilmente a causa del fatto che è una delle Nazioni del mondo con maggior patrimonio costruito, soprattutto di natura monumentale.

Si può inoltre sottolineare che in queste Nazioni spesso le ricerche hanno come casi di studio edifici appartenenti al proprio patrimonio storico. Questo è dovuto al fatto che in Europa sono presenti molti edifici storici e che i ricercatori preferiscono studiare casi selezionati dalla loro Nazione di provenienza, sia per preservare il proprio patrimonio nazionale ma anche a causa di ragioni di tipo burocratico, logistico e di conoscenza.

Un discorso analogo può essere applicato anche alla Cina (Figura 1.5) e all'Iran (1.6), dove gran parte dei ricercatori studiano edifici della loro Nazione. Vale la pena far notare come in questi casi l'interesse verso gli aspetti energetici degli edifici storici non abbia seguito le inflessioni dovute alle crisi economiche ed energetiche, ma sia anzi una tendenza abbastanza recente che ha preso piede negli ultimi anni.

CINA: PIL e Numero di pubblicazioni

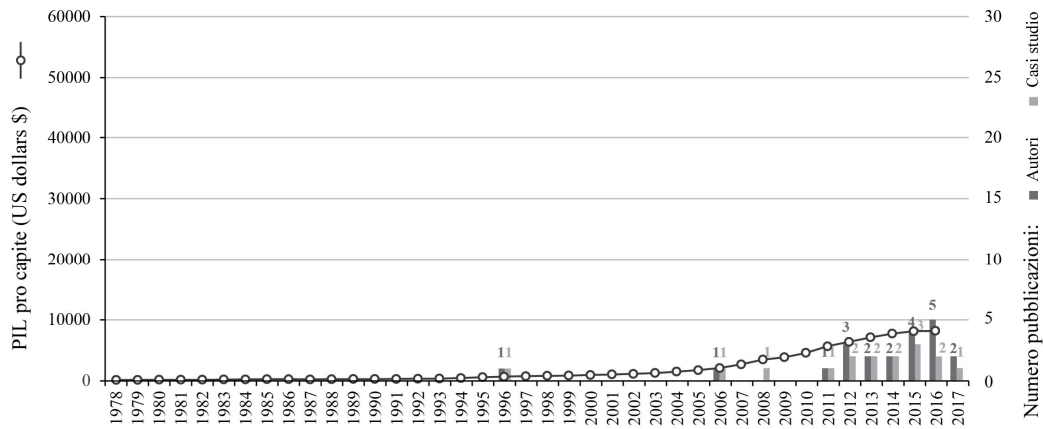


Fig. 1.5: PIL pro capite cinese, numero di pubblicazioni redatte da autori di Istituzioni cinesi e numero di pubblicazioni con oggetto casi studio del patrimonio cinese.

IRAN: PIL e Numero di pubblicazioni

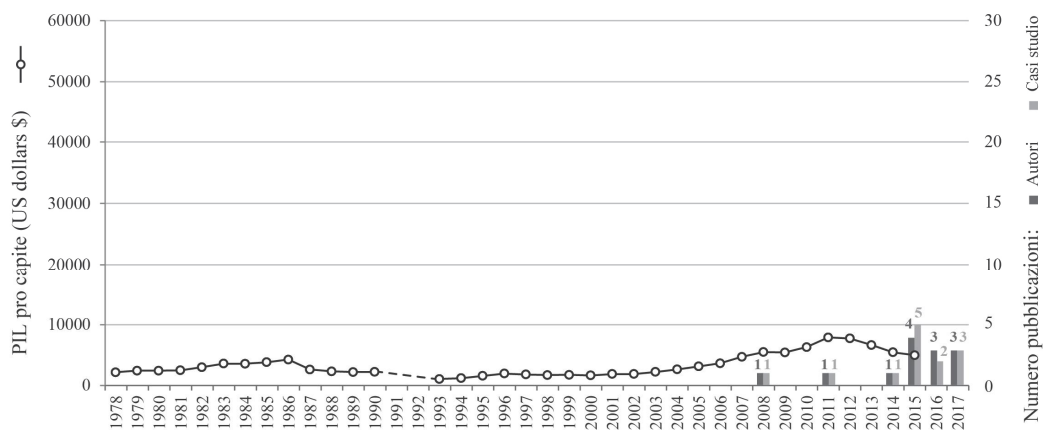


Fig. 1.6: PIL pro capite iraniano, numero di pubblicazioni redatte da autori di Istituzioni iraniane e numero di pubblicazioni con oggetto casi studio del patrimonio iraniano.

Discorso a parte può essere fatto per gli Usa (Figura 1.7), in cui il PIL non ha mai avuto inflessioni. Nonostante l'influenza di questa Nazione a livello economico ed accademico, le ricerche sono in numero esiguo e, a causa della povertà di monumenti storici propri, sono sempre focalizzate su casi studio appartenenti ad altre Nazioni (principalmente Malesia, Kuwait, Iran, Italia).

USA: PIL e Numero di pubblicazioni

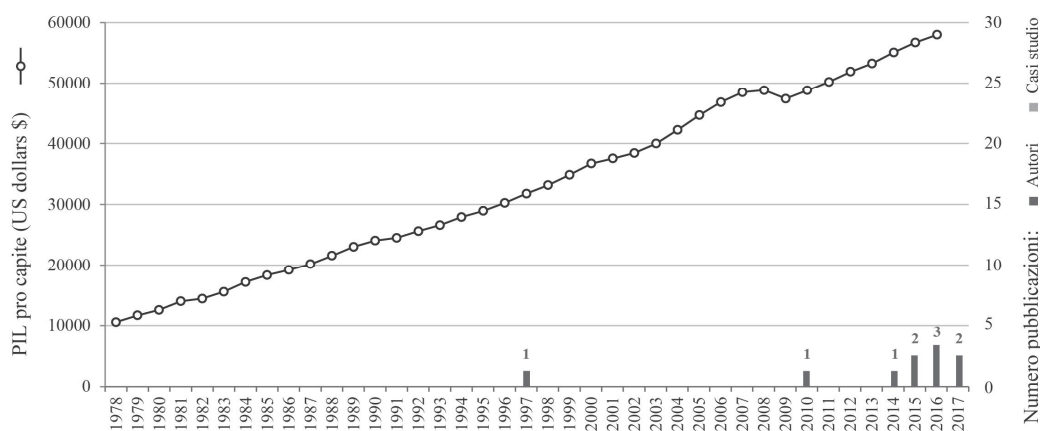


Fig. 1.7: PIL pro capite statunitense, numero di pubblicazioni redatte da autori di Istituzioni statunitensi e numero di pubblicazioni con oggetto casi studio del patrimonio statunitense.

Oltre all'andamento temporale, merita una nota di riguardo la distribuzione geografica delle ricerche, che vede i ricercatori delle Istituzioni Italiane affermarsi come leader indiscussi nel settore, con il 35,1% degli articoli pubblicati, seguita dall'Inghilterra (9,1%), dalla Cina (7%), e dalla Spagna (5,7% l'una). A seguire Iran (4,3%), Belgio, Usa e India (3,7%), Malesia e Turchia (3%), Danimarca e Portogallo (2,3%).

Da notare invece che Germania (2%) e Francia (1,3%), pur essendo importanti potenze economiche e pur trovandosi al centro della molto attiva area Europea, si pongono come fanalino di coda con un numero fortemente esiguo di ricerche su questo tema. In Figura 1.8 viene riportata la lista completa delle ricerche, suddivise per provenienza degli istituti di ricerca ai quali appartengono gli autori.

Un'ultima considerazione sulla distribuzione spazio-temporale delle ricerche può essere condotta mediante l'osservazione di Figura 1.9, che riporta l'andamento dei contributi delle singole Nazioni in differenti periodi di riferimento.

Coerentemente con la crescita esponenziale del numero di ricerche negli ultimi anni, come precedentemente descritto, la scansione temporale (evidenziata con una scala cromatica) viene presentata al fine di fornire un impatto visivo ed immediato su come lo stato dell'arte sia cambiato e stia ad oggi continuando ad evolversi.

Innanzitutto si può notare come l'Europa sia il centro degli studi sugli aspetti energetici degli edifici del patrimonio e come l'Italia, oltre ad avere nettamente il maggior numero di studi a riguardo, ha fin da subito avuto un ruolo di leadership e lo ha mantenuto nel tempo.

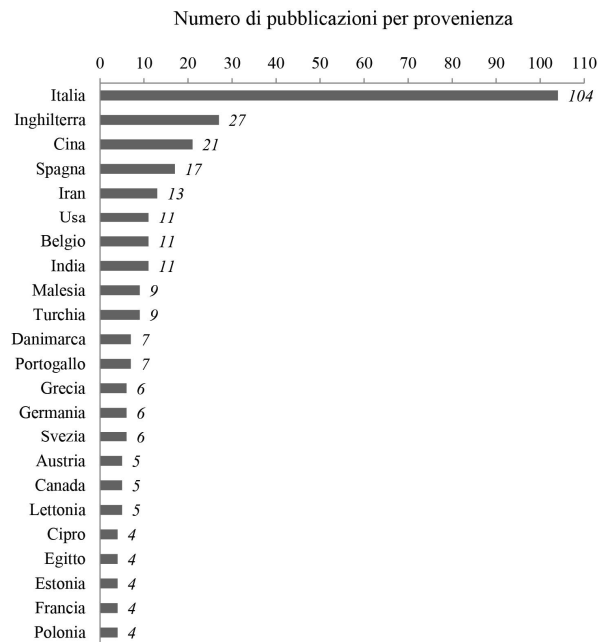


Fig.1.8: Numero di pubblicazioni divise per nazionalità degli istituti di ricerca ai quali appartengono gli autori.

In secondo luogo, si può nuovamente notare come le Nazioni precedentemente citate, che hanno prodotto un gran numero di pubblicazioni (Inghilterra, Spagna, Cina, Iran e Usa), hanno iniziato ad avvicinarsi al tema in tempi abbastanza recenti, spesso dopo il 2000, con un forte incremento nell'arco degli ultimi anni.

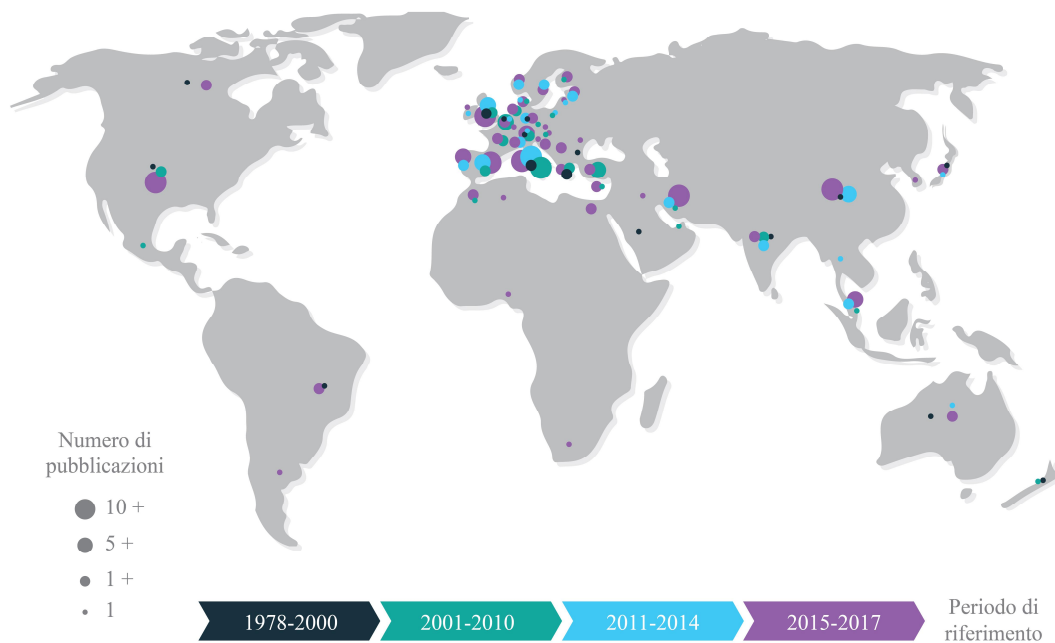


Fig. 1.9: Distribuzione spazio-temporale delle pubblicazioni.

1.2.3 Obiettivi e temi trattati

L'adeguamento energetico degli edifici agli attuali standard di efficienza energetica ed aspettative di comfort termico è un tema di cruciale importanza nell'ottica di miglioramento della sostenibilità ambientale, della performance energetica e del mantenimento degli edifici storici del patrimonio costruito.

Si stanno avvicinando allo studio di questo tema un numero sempre maggiore di ricercatori provenienti da molteplici ambiti, da quelli storicamente più vicini allo studio del patrimonio, come il Restauro, l'Architettura e l'Archeologia, a nuove figure provenienti da alti settori scientifici, come la Fisica Applicata, l'Ingegneria e la Chimica.

La ricerca sugli edifici storici in questo settore può avere molteplici obiettivi, come evidenziato in Figura 1.10.

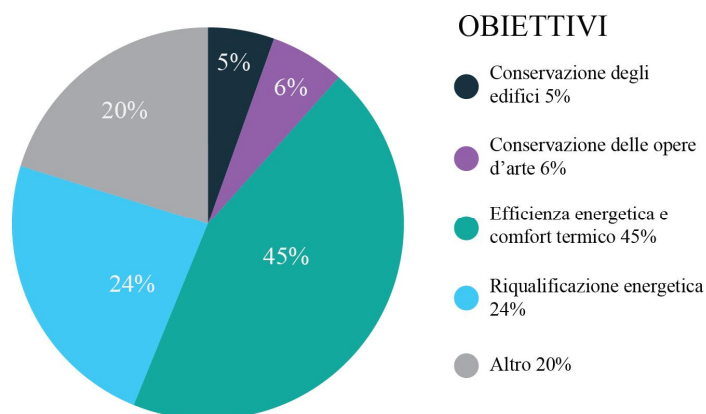


Fig. 1.10: Obiettivi delle ricerche analizzate.

L'obiettivo principale delle ricerche è lo studio dell'efficienza energetica e del comfort termico all'interno degli edifici storici (45%), a volte con la finalità di riqualificazione energetica e retrofit (24%).

Poiché gli edifici storici spesso contengono al loro interno delle opere d'arte, il 6% delle ricerche ha come obiettivo la loro conservazione, mentre il 5% è direttamente interessato all'analisi delle condizioni interne e della performance delle pareti perimetrali, al fine di preservare l'edificio stesso dal degrado.

Infine, il 20% degli studi ha obiettivi multipli, che includono lo sviluppo di metodologie per lo studio degli edifici storici, approfondimenti teorico-statistici, studio di città o quartieri, *review* sul tema.

La Figura 1.11 riporta le parole chiave maggiormente ricorrenti nelle ricerche analizzate⁶, suddivise in cinque macro-categorie: modellazione e misurazione, impianti tecnologici, comportamento passivo, comfort e qualità dell'aria ed aspetti teorici.

Risulta subito evidente come un larghissimo numero di ricerche (29,8%) si focalizzi sulla valutazione delle performance termoigrometriche degli edifici storici. Tale tema viene trattato a volte mediante modelli di simulazione predittivi, ovvero miranti a determinare le prestazioni attraverso modelli analitici o numerici, a volte tramite misurazioni sperimentali effettuate all'interno degli edifici stessi. In alcuni casi vengono utilizzati entrambi gli approcci, con il fine di validare i modelli teorici attraverso delle misurazioni campione e poter seguentemente predire nuovi scenari e valutare eventuali interventi di riqualificazione energetica.

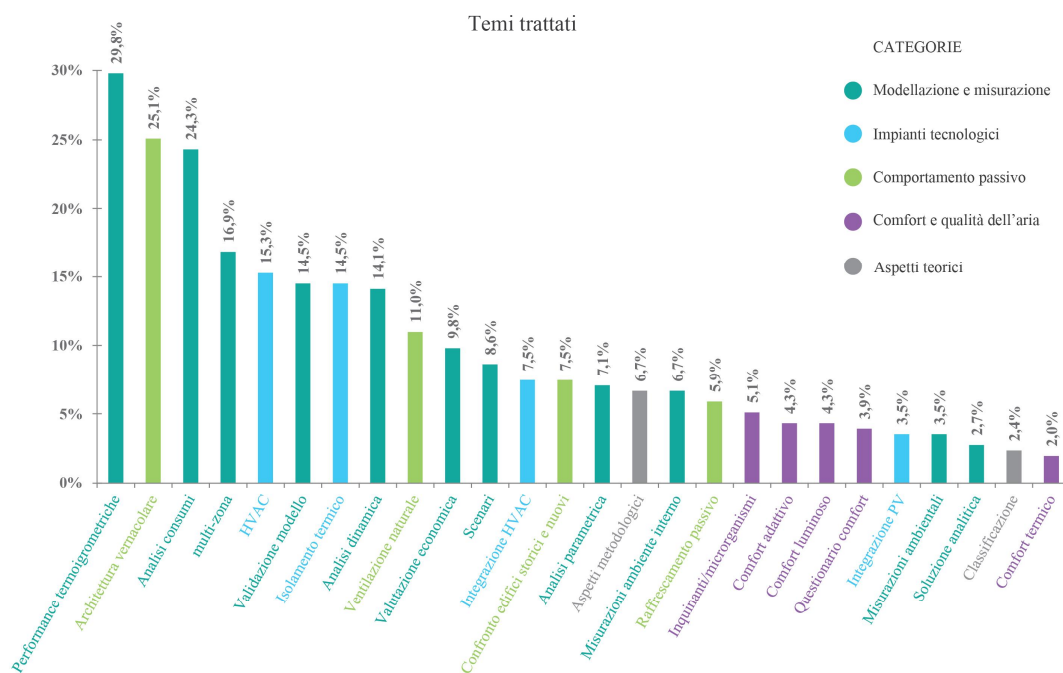


Fig. 1.11: Temi trattati nelle ricerche sul patrimonio.

Il 25,1% delle ricerche studia gli aspetti energetici dell'architettura vernacolare⁷ e quindi al

⁶ La percentuale è stimata sull'intero database di 296 lavori ma, poiché ogni ricerca contiene più parole chiave, la somma delle percentuali riportate in figura supera il 100%.

⁷ Vengono definite vernacolari quelle architetture legate al contesto fisico e culturale di determinate aree geografiche o regioni. Rappresentano una sintesi tra forma e funzione, che collega aspetti tettonici a

comportamento passivo, senza utilizzo di impianti HVAC, di tale architetture del patrimonio.

Molte pubblicazioni studiano il tema dell'isolamento termico (16,9%), cruciale quando si parla di edifici storici che generalmente sono privi di coibentazione [46] [47] [48] [49] [50] [51]. Gran parte degli studi delle Nazioni con climi continentali, come Germania [25], Austria e Svizzera [52] [53] [54], Paesi scandinavi [55] [56], Paesi baltici [57] [58] [59] [60] e Paesi balcanici [61] [62], si focalizza proprio su questo tema.

Inoltre, molte ricerche affrontano il discorso più generico dei consumi, indagando l'efficienza degli impianti di condizionamento e ventilazione meccanica HVAC⁸ o l'integrazione di essi all'interno di edifici del patrimonio.

Vale la pena sottolineare che il maggior numero delle ricerche riguardanti proprio l'integrazione degli impianti negli edifici storici, specialmente quelle dedicate all'integrazione architettonica e criteri di preservazione dell'edificio o delle opere d'arte in esso contenute, sono effettuate da studiosi italiani su edifici o monumenti di particolar pregio del patrimonio storico italiano [39] [47] [63] [64] [65] [66] [67] [68] [69] [70].

Risulta interessante notare come, a fronte delle numerose ricerche riguardanti aspetti tecnologici, impiantistici e prestazionali, solo il 6,3% di queste tratti espressamente questioni di comfort e qualità dell'aria, incluso il trasporto di inquinanti e microrganismi (5,1%). Nello specifico, questi studi pongono spesso l'attenzione sulla percezione degli utenti, effettuando indagini sul campo mediante questionari (3,9%) oppure utilizzando modello di comfort adattivo, che non prevede l'utilizzo di HVAC (4,3%).

Gran parte di questi studi sono condotti in Paesi in cui bisogna far fronte al clima caldo, come quelli mediterranei (Italia [71] [72] [73], Spagna [74] [75], Portogallo, Grecia [76], Cipro [77] [78], Turchia [79] [80], Algeria [81]), sudamericani (Brasile [82], Argentina [83]), e asiatici (Iran [84] [85] [86] [87] [88], Cina [89] [90] [91] [92], Malesia [93], India [94] [95] [96] [97] [98] [99], Vietnam [100]). In questi Paesi è anche forte l'interesse verso l'architettura vernacolare [101] [102] [103], la ventilazione naturale e il raffrescamento passivo.

quelli culturali, climatici, logistici, come la reperibilità dei materiali, e a quelli di necessario adattamento alle condizioni esterne.

⁸ *Heating, Ventilation and Air Conditioning.*

1.2.4 Età degli edifici

Data la difficoltà nel reperire edifici sufficientemente conservati allo scopo di ricerche sul funzionamento energetico, molti degli edifici storici analizzati sono successivi al XII sec. Tuttavia non mancano studi condotti sul comportamento energetico di edifici ben più antichi, di cui si hanno rimanenze archeologiche, e nei quali le tecniche di analisi diventano uno strumento per indagare il possibile assetto antico al fine di comprenderne i principi di funzionamento [41] [104].

Come mostrato in Figura 1.12, gli edifici studiati risalgono maggiormente al XIX e XX sec. Questo è dovuto da un lato al fatto che spesso le ricerche mettono a confronto edifici del patrimonio storico con edifici più recenti [105] [84] [106] [107] [79] [108] [109] [110] [76] [111], dall'altro al fatto che gli edifici del XX sec. hanno meno vincoli restrittivi riguardo alla loro preservazione e dunque minor problemi riguardo l'applicabilità di eventuali interventi di riqualificazione energetica.

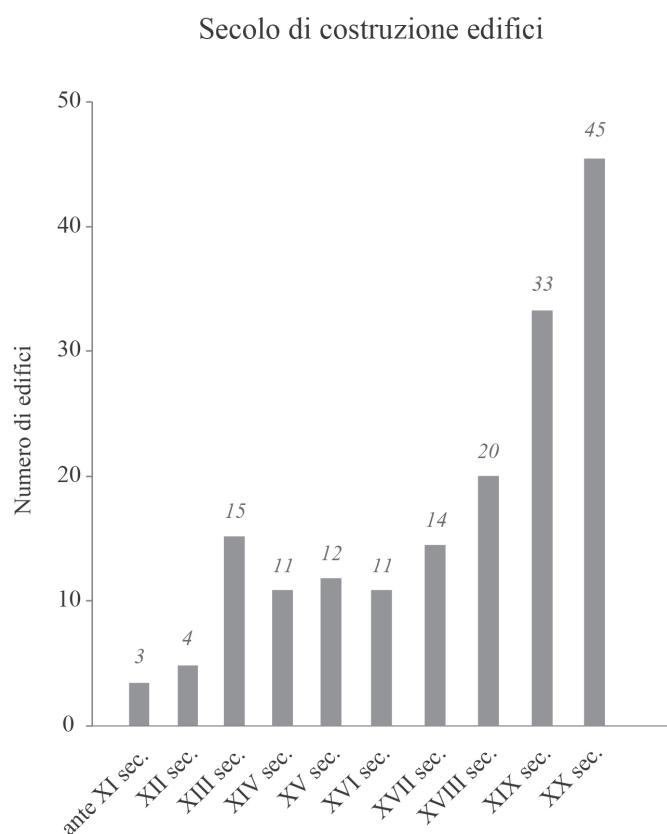


Fig. 1.12: Secolo di costruzione edifici analizzati.

1.3 Tipi di edifici

Gran parte degli studi condotti sul patrimonio possono essere classificati a seconda del tipo di edificio analizzato come caso studio. Come mostrato in Figura 1.13 gran parte delle ricerche si focalizzano sugli edifici ad uso residenziale (43%), mentre la parte restante si divide tra palazzi, uffici e luoghi di istruzione (21%), luoghi di culto (12%), musei, biblioteche e teatri (11%), spazi urbani (3%) e siti archeologici (1%).

La rimanente parte delle ricerche (9%) non può essere classificata in tal senso poiché o analizza edifici al di fuori delle categorie sopra descritte oppure presenta approcci teorici e nuove metodologie di analisi per lo studio dell'efficienza energetica negli edifici storici, ma privi di esempi applicativi.

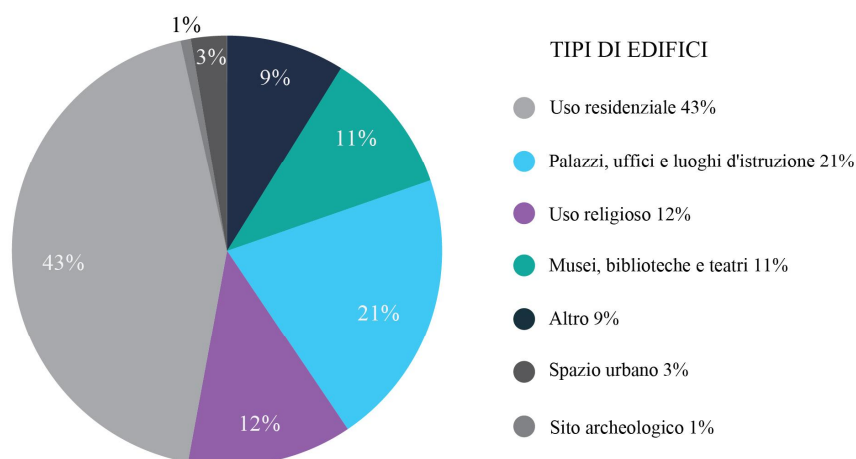


Fig. 1.13: Destinazioni d'uso degli edifici analizzati.

1.3.1 Uso residenziale

Come detto precedentemente, gran parte delle ricerche analizzate si focalizzano su edifici storici ad uso residenziale.

Molte delle ricerche effettuate prima del 2010 si dedicano allo studio degli aspetti bioclimatici dell'architettura vernacolare propria di differenti aree geografiche [112] [82] [113] [114] [115] [116] [117] [118] [119]. Altri studi invece applicano varie tecniche di analisi agli edifici del patrimonio, come indagini sul campo, simulazioni e campagne di monitoraggio delle performance termo-igrometriche, e spesso confrontano il comportamento energetico di edifici storici con quello di edifici di più recente costruzione [76] [105] [107] [79] [84] [108] [120] [121] [122] [123].

Tra questi risulta interessante lo studio condotto da Ealiwa et al. [105] sulle sensazioni di comfort provate all'interno di edifici libici tradizionali (con ventilazione naturale) e moderni (con impianti di condizionamento). L'analisi, condotta alla fine degli anni '90 mediante questionari e misurazioni (temperatura, umidità e velocità dell'aria), mostra che gli utenti intervistati provano una sensazione di maggior comfort in edifici del patrimonio ventilati in modo naturale.

Tutt'altro metodo di indagine viene portato avanti da Martín Ocaña et al. [107], i quali confrontano due edifici rurali della Spagna centrale (uno del XIX sec. e l'altro del 1980) indagando le dispersioni termiche attraverso le pareti perimetrali mediante la termografia.

Dallo studio condotto da Cantin et al. [108], una investigazione su 11 edifici collocati in varie aree francesi, emerge che il consumo medio nelle abitazioni storiche è inferiore ai consumi che generalmente si hanno nelle abitazioni esistenti, a parità di performance. La motivazione viene ricondotta al fatto che gli edifici storici presentano aspetti distributivi e caratteristiche bioclimatiche ben più complesse di quelli moderni. A fronte di queste considerazioni, viene sottolineata l'esigenza di uno studio approfondito sul comportamento degli edifici storici prima di qualsivoglia intervento di riqualificazione energetica.

Molte ricerche studiano i caratteri tipologici dell'architettura tradizionale legati al controllo climatico. Tra queste meritano una nota di riguardo gli studi condotti da alcuni ricercatori asiatici: Singh et al. [94] [95] [97] [124] mettono in risalto le relazioni tra aspetti bioclimatici, socio-economici e culturali dell'architettura vernacolare dell'India nord-orientale, con l'obiettivo di individuarne i caratteri ricorrenti; Omar & Syed-Fadzil [125] portano avanti studi più tecnici, monitorando le performance termo-igrometriche di un edificio del patrimonio malese che utilizza un sistema di raffrescamento passivo tradizionale; Li et al. focalizzano i

propri studi sulle residenze contadine collettive *tulou* ("costruzione di terra"), tradizionali della Cina meridionale, effettuando misurazioni e simulazioni con lo scopo di determinarne i consumi [126] e somministrando questionari sul comfort termico, acustico e luminoso [127] con l'obiettivo di mostrare i benefici di abitazioni con pareti ad elevata inerzia rispetto alle comuni residenze rurali. In particolar modo la Cina, negli ultimi anni, si sta distinguendo per il gran numero di ricerche condotte sulle abitazioni rurali e vernacolari, combinando simulazioni predittive a campagne di monitoraggio [128] [129] [130] [131] [132] [133].

Un'altra Nazione altrettanto attiva è l'Iran, dove si stanno diffondendo molteplici studi che indagano i caratteri bioclimatici dell'architettura tradizionale [134] [135] [136] e la relativa percezione, in termini di comfort, da parte degli utenti [137].

Di particolare interesse la pubblicazione di Saeli & Saeli [138] sulle Camere dello Scirocco di Villa Naselli-Amblers a Palermo, una interessante struttura di raffrescamento passivo risalente al XVI sec. costituita da sale ipogee poste vicino a sorgenti d'acqua. Gli autori riportano uno studio condotto mediante ricerche storiche, rilievi architettonici e misurazioni termigrometriche, con lo scopo di valutare l'efficacia delle sale ipogee in termini di raffrescamento. Nel *paper* gli autori sostengono che questo tipo di presidio riesce, almeno parzialmente, a risolvere il problema del surriscaldamento estivo nei climi caldo-aridi: la camera di Villa Naselli, anche nella sua configurazione non del tutto originale, mostra una riduzione delle temperature esterne da 2 a 4°C e a una differenza del tasso di umidità del 5-10%, senza alcun utilizzo di impianti attivi.

Molte altre ricerche si focalizzano sui metodi di stima dei consumi di edifici del patrimonio in varie aree climatiche [139] [140] [141] [142] [143] [144].

Tra queste, la ricerca sperimentale condotta da Cardinale et al. [145] su due esempi di architettura vernacolare italiana: i sassi di Matera e i trulli di Alberobello. Tale studio mette in risalto le difficoltà legate alla simulazione del comportamento termo-igrometrico di strutture con elevata massa termica mediante i software dinamici di maggior utilizzo ("multi-zona") e dunque l'utilità delle campagne di misurazione su tali edifici. Attraverso la misurazione reale delle performance, lo studio enfatizza i vantaggi del comportamento passivo di questi edifici, soprattutto nella stagione estiva.

Uno studio analogo è stato condotto da Du et al. [89] su di un'abitazione tipica cinese. In questo caso lo studio prevede molteplici approcci, come le misurazioni in situ e simulazioni effettuate utilizzando vari metodi e modelli. Tra questi vengono utilizzati anche modelli di CFD sui flussi d'aria tra abitazione e corte interna, al fine di valutare gli effetti di raffrescamento passivo indotti dalla corte e l'influenza del microclima sul comfort interno.

Un'altra ricerca che utilizza lo strumento della CFD è quella condotta da Ramírez-Balas et al. [146] sulla *Cité de Refuge*, un edificio residenziale costruito negli anni '30 su progetto di Le Corbusier. L'architetto aveva previsto due impianti tecnologici che non vennero mai realizzati: il *mur neutralisant*, una parete in doppio vetro la cui cavità interna poteva essere riscaldata o raffreddata, e la *respiration exacte*, ovvero un sistema meccanizzato di ricambio d'aria mantenuta a temperatura costante. In questo studio la simulazione diventa uno strumento di indagine finalizzato a verificare l'efficacia di un sistema di controllo climatico mai realizzato.

Molte altre sono le ricerche dedicate alla valutazione delle performance e dell'efficacia del raffrescamento passivo nei climi caldi, tra cui quelle che analizzano la ventilazione naturale degli edifici residenziali in mediterraneo [147] [148] [149] [150] [151] [152]; altri studi invece sono dedicati all'analisi dell'isolamento termico e della difesa dal freddo nei climi più rigidi del nord Europa [153] [154].

Un gran numero di ricerche ha come obiettivo la riqualificazione energetica del patrimonio, spesso indagando l'efficacia di diversi scenari di retrofit attraverso analisi parametriche [48] [49] [155] [156] [157] [158] [159] [160] [161] [162]. Taluni di questi studi si focalizzano sull'integrazione impiantistica ai fini del miglioramento dell'efficienza, nel rispetto della conservazione del bene oggetto di studio o del contesto urbano e paesaggistico [163] [164] [165].

Tra questi è di particolare interesse il confronto condotto da Stazi et al. [166] tra tre edifici residenziali, localizzati in centro Italia e costruiti nel XX sec., con caratteristiche simili e stratigrafie differenti delle pareti (mattoni pieni, laterizi forati e laterizi forati isolati esternamente). Attraverso campagne sperimentali e simulazioni dinamiche, l'obiettivo di questo studio è determinare la miglior strategia di retrofit, in termini di comfort e risparmio energetico, tra differenti ipotesi di isolamento.

Uno studio analogo è stato condotto dai medesimi autori [167] con l'obiettivo di approfondire il tema dell'isolamento termico legato all'inerzia in clima mediterraneo. Tale studio è stato condotto attraverso analisi dinamiche con un modello "multi-zona", validato attraverso misurazioni sperimentali, ed include anche aspetti economici. L'obiettivo della ricerca è quello di dimostrare l'efficacia della ventilazione naturale combinata ad una elevata inerzia termica interna e dunque determinare la migliore strategia di riqualificazione e il posizionamento più opportuno dell'isolante.

Merita una nota lo studio condotto da Cardinale et al. [168] sul rione Casalnuovo di Matera, un'area a sud della città attualmente abbandonata ma che sarà probabilmente sede del futuro Museo demo-etno-antropologico della città. L'obiettivo della ricerca è quello di valutare lo stato

di conservazione degli edifici di questa zona, principalmente abitazioni in grotta, mediante l'utilizzo di strumenti e tecniche non invasive, tra le quali in primis la termografia a infrarossi. Alcuni degli studi più recenti, tra cui quelli condotti da vari autori inglesi [169] [170] [171] [172], si focalizzano sulla riduzione dei consumi mediante l'efficientamento termico ed impiantistico degli edifici residenziali attualmente abitati, spesso includendo studi statistici e valutazioni economiche [173] [174] [175] [176] [177] [178] [179] [180] [181] [182]; rimane sempre attivo l'interesse verso l'architettura tradizionale, vernacolare e spontanea [183] [184] [75] [136].

Il grande numero di pubblicazioni, aumentato soprattutto dal 2015 ad oggi, testimonia quanto stia crescendo l'interesse verso l'efficientamento energetico e la riduzione dei consumi del patrimonio esistente, in particolar modo verso l'architettura residenziale.

In Tabella 1.1 vengono riportati, in ordine cronologico, gli articoli precedentemente citati; sono specificati l'anno di pubblicazione, Nazione in cui lavorano gli autori, la localizzazione e l'anno di costruzione degli edifici studiati e la tecnica di analisi utilizzata. Tra le tecniche di analisi vengono divise nelle seguenti categorie: indagine (raccolta dati, somministrazione questionari, etc.); monitoraggio (campagne di misurazioni); termografia; simulazione (utilizzo di metodi di calcolo o software); CFD (utilizzo di modelli di termo-fluido dinamica computazionale); review (lavori sullo stato dell'arte).

Anno	Autori	Nazione in cui lavorano gli autori	Localizzazione edificio	Anno di costruzione	Tecnica di analisi
1996	L. Jingxia [112]	Cina	Cina		Indagine
1996	P.C. Grindley & S.D. Probert [76]	Grecia, Inghilterra	Grecia	1750	Simulazione
1998	L. Labaki & D. Kowaltowski [82]	Brasile	Brasile		Indagine
1999	M.N.A. Said et al. [28]	Canada	Canada	1878	Monitoraggio
2001	M.A. Ealiwa et al. [105]	Inghilterra	Libia		Indagine
2002	D. Oktay [113]	Turchia	Cipro		Indagine
2002	M. Á. Porta-Gándara et al. [122]	Messico	Messico		Monitoraggio, Simulazione
2003	S. Martín Ocaña et al. [107]	Spagna	Spagna	1800, 1900	Termografia
2005	N. Ozay [79]	Turchia	Cipro	1500, 1800	Indagine
2006	W. Renping & C. Zhenyu [114]	Cina	Cina		Indagine
2007	N. Engin et al. [115]	Turchia	Turchia		Indagine
2007	N. Vural et al. [116]	Turchia	Turchia		Indagine
2008	J. Bouillot [117]	Francia	Cina		Indagine
2008	J. van Hoof & F. van Dijken [118]	Olanda	Islanda		Indagine
2008	M.S. Hatamipour & A. Abedi [84]	Iran	Iran		Indagine, Simulazione
2009	M.K. Singh et al. [94]	India	India		Indagine
2009	M.K. Singh et al. [95]	India	India		Monitoraggio
2009	A. M. Vissilia [119]	Grecia	Grecia		Indagine
2010	R. Cantin et al. [108]	Francia	Francia	1400, 1900	Indagine, Monitoraggio
2010	A.S. Dili et al. [96]	India			Monitoraggio
2010	N. Cardinale et al. [71]	Italia			Monitoraggio, Simulazione
2010	Z. Zhai & J.M. Previtali [101]	Usa	Mondo		Simulazione
2010	M. K. Singh et al. [124]	India, Israele, Usa	India		Monitoraggio
2011	A.T. Nguyen et al. [100]	Belgio, Vietnam	Vietnam		Simulazione, CFD
2011	M.K. Singh et al. [97]	India	India		Indagine
2011	N. Omar & S.F. Syed-Fadzil [125]	Malesia	Malesia	1800	Monitoraggio
2011	S. Chiraratnanon & V. Hien [123]	Tailandia	Tailandia		Monitoraggio
2011	J. Liu et al. [133]	Cina, Giappone	Cina		Monitoraggio
2012	Q. Li et al. [126]	Cina	Cina	1400, 1900	Indagine, Simulazione
2012	M. Morelli et al. [182]	Danimarca	Danimarca	1896	Indagine, Simulazione, Termografia
2012	R. Shanthi Priya et al. [98]	India	India		Monitoraggio
2012	P. Lankester & Brimblecombe [139]	Inghilterra	Europa	1400	Simulazione
2012	F. Moran et al. [140]	Inghilterra	Inghilterra		Indagine
2012	L.C. Tagliabue et al. [155]	Italia	Italia		Indagine, Simulazione
2013	S. Kacher [81]	Algeria	Algeria		
2013	Q. Li et al. [127]	Cina	Cina	1400, 1900	Monitoraggio, Indagine
2013	F. Stazi et al. [166]	Italia	Italia	1945, 1975	Monitoraggio, Simulazione
2013	F. Pérez Gálvez et al. [48]	Spagna	Spagna	1700	Simulazione
2013	A. Bouchair et al. [147]	Algeria	Algeria		Indagine
2014	X. Du et al. [89]	Cina, Olanda	Cina	1600	Simulazione, CFD, Monitoraggio
2014	E. Arumägi & T. Kalamees [156]	Estonia	Estonia	1800, 1900	Monitoraggio, Simulazione
2014	Ü. Alev et al. [157]	Estonia, Finlandia, Svezia	Estonia, Finlandia, Svezia	1700-1900	Monitoraggio, Simulazione
2014	S. Bodach et al. [120]	Germania			
2014	P. De Berardinis et al. [49]	Italia, Canada	Italia		Simulazione, Termografia
2014	P. Bonomo & De Berardinis [163]	Italia	Italia		Simulazione
2014	A.H.G. Hoseini et al. [93]	Malesia, Usa, Canada	Malesia		
2014	C.S. Polo López & F. Frontini [54]	Svizzera	Svizzera	1600, 1890, 1904	Indagine
2014	K.I. Praseeda et al. [143]	India	India		Simulazione, Monitoraggio
2014	M.M. Barbero-Barrera et al. [152]	Spagna	Spagna		Indagine
2014	R. De Lieto Vollaro et al. [144]	Italia	Italia	1800	Simulazione, Termografia
2014	A. L. Pisello et al. [164]	Italia	Italia	1700	Simulazione
2014	K. Ghazi Wakili et al. [161]	Svizzera	Svizzera	1877	Simulazione, Termografia
2015	P. Resuli & S. Dervishi [158]	Albania	Albania	1920	Simulazione
2015	H. Sun & M. Leng [128]	Cina	Tibet		Monitoraggio, Simulazione
2015	S. Gou et al. [129]	Cina	Cina	1905	Monitoraggio, Simulazione
2015	J. Liu et al. [130]	Cina	Cina		Monitoraggio, indagine
2015	L. Xiaoyu & J. Beisi [131]	Cina	Cina		
2015	C. Cristofari et al. [159]	Francia, Lituania	Francia		Monitoraggio
2015	T. Kubota & D.H.C. Toe [111]	Giappone, Malesia	Malesia	1800	Monitoraggio
2015	A. Beizaee et al. [169]	Inghilterra	Inghilterra	1930	Monitoraggio
2015	A. Foruzanmehr [137]	Inghilterra	Iran		Indagine
2015	M. Fox et al. [50]	Inghilterra	Inghilterra	1700, 1900	Termografia
2015	Saljoughinejad & Sharifabad [134]	Iran	Iran		Indagine

2015	R. Soleymanpour et al. [135]	Iran	Iran		Indagine
2015	V. Belpoliti & G. Bizzarri [160]	Italia	Italia	1900	Indagine
2015	M. Saeli & E. Saeli [138]	Italia	Italia	1500	Monitoraggio
2015	F. Roberti et al. [180]	Italia	Italia	1200	Monitoraggio, Simulazione
2015	K. Fabbri & B. Brunetti [51]	Italia	Italia		Simulazione
2015	F. Stazi et al. [167]	Italia	Italia	1920	Monitoraggio, Simulazione
2015	G. Desogus et al. [185]	Italia	Italia	1920	Monitoraggio
2015	D.H.C. Toe & T. Kubota [121]	Malesia, Giappone	Malesia		Monitoraggio
2015	S. Tadeu et al. [43]	Portogallo	Portogallo	1900	Simulazione
2015	C. Ramírez-Balas et al. [146]	Spagna	Francia	1933	CFD
2015	A. Almssad & A. Almusaed [153]	Svezia, Iraq	Svezia		Indagine
2015	M. Harrestrup & S. Svendsen [154]	Danimarca	Danimarca	1930	Monitoraggio, Simulazione
2015	T. Cardinale et al. [168]	Italia	Italia	1600	Termografia
2015	T. Dalla Mora et al. [162]	Italia	Italia	1300	Indagine
2016	M. Seddiki et al. [173]	Algeria, Inghilterra	Algeria	1800	Indagine, Simulazione
2016	N. Willand et al. [141]	Australia, Cina	Australia		Indagine
2016	L. Huang et al. [132]	Cina, Inghilterra	Tibet	1843	Monitoraggio, indagine
2016	F. Soflaei et al. [87]	Cina, Usa, Iran	Iran		Indagine
2016	G. Martinopoulos et al. [142]	Grecia	Grecia		Indagine
2016	S.S. Chandel et al. [102]	India	India		Review
2016	A. Byrne et al. [46]	Irlanda	Irlanda		Monitoraggio, Simulazione
2016	M. Sala et al. [174]	Italia, Svizzera	Svizzera	1900	Simulazione
2016	A.L. Pisello et al. [151]	Italia, Usa			Simulazione
2016	G. Desogus et al. [72]	Italia	Italia		Indagine
2016	G. Ciulla et al. [175]	Italia	Italia		Indagine, Simulazione
2016	F.G. Giucastro & D. Giordano [73]	Italia	Italia		Indagine
2016	E. Negro et al. [70]	Italia	Italia		Indagine
2016	A. Salehi et al. [148]	Portogallo	Portogallo	1952	CFD, Monitoraggio
2016	L. Đukanović et al. [62]	Serbia	Serbia	1911	Simulazione, Termografia
2016	B. Montalbán Pozas & F.J. Neila González [74]	Spagna	Spagna		Simulazione
2016	M. Dabaieh et al. [165]	Svezia, Egitto	Egitto		Indagine
2017	H. Yan et al. [92]	Cina	Cina		Indagine, Monitoraggio
2017	A. Evcil & L.E. Vafaei [176]	Cipro	Cipro		Indagine
2017	M. Philokyprou et al. [77]	Cipro	Cipro		Indagine
2017	A. Michael et al. [78]	Cipro	Cipro		Simulazione
2017	T. Psomas et al. [177]	Danimarca	Danimarca	1937	Monitoraggio
2017	T.H. Pedersen et al. [178]	Danimarca	Danimarca		Simulazione
2017	G. Elshafei et al. [149]	Egitto	Egitto		CFD, Monitoraggio
2017	S. Mitra & S. Bose [99]	India	India		Indagine
2017	T. Kane et al. [170]	Inghilterra	Inghilterra		Monitoraggio
2017	A. Pathan et al. [171]	Inghilterra	Inghilterra		Indagine, Monitoraggio
2017	I.G. Hamilton et al. [172]	Inghilterra	Inghilterra		Monitoraggio
2017	F. Yousefi et al. [181]	Iran, Usa	Iran		Monitoraggio, Review, Simulazione
2017	F. Roberti et al. [179]	Italia	Italia	1200	Simulazione
2017	H. Mastouri et al. [150]	Marocco	Marocco		Monitoraggio, Simulazione
2017	S. Alves [75]	Spagna	Portogallo		Indagine
2017	F. Soflaei et al. [136]	Usa, Iran	Iran		Indagine, Simulazione
2017	T. Kubota et al. [183]	Malesia, Giappone	Malesia		Monitoraggio
2017	R. Tomovska & Radivojevic [184]	Macedonia, Serbia	Macedonia		Indagine

Tab. 1.1: Edifici ad uso residenziale.

1.3.2 Palazzi, uffici e luoghi di istruzione

La prima osservazione che può essere condotta osservando l'elenco delle pubblicazioni riportato in Tabella 1.2, contenente quelle che hanno come oggetto di studio Palazzi, uffici e luoghi di istruzione, è che l'Italia ha avuto e continua ad avere un ruolo dominante: il 48% delle ricerche analizzate, difatti, è stato condotto su edifici localizzati in Italia.

Questo è in particolar modo evidente nelle ricerche sui Palazzi storici che, ad eccezione di pochi lavori [186] [186] [187] [188], hanno casi di studio localizzati in Italia e nello specifico nelle seguenti città: Padova [33], Palermo [35] [189] [42], Modena [37], Firenze [40], Benevento [63], Torino [190], Venezia [191], Catania [192] [67], Napoli [193] [194], Aversa [195] e Bologna [196].

Il primo studio analizzato risale al 2004 ed è stato condotto da Camuffo et al. [33] sulla Sala detta "dei Giganti" del Palazzo dei Carraresi a Padova con l'obiettivo di preservare gli affreschi da potenziali danni dovuti all'utilizzo della sala, come quelli dovuti all'impianto di riscaldamento, all'illuminazione e alla presenza di molte persone. Dallo studio, basato su misurazioni sperimentali e correlazione delle condizioni microclimatiche al danno delle opere d'arte ed architettoniche, emerge che nella stagione fredda è necessario evitare squilibri di temperatura ed umidità dovuti all'accensione e allo spegnimento dell'impianto di riscaldamento. Tuttavia, il mantenimento di queste variabili costanti è una strategia molto costosa e difficoltosa, per questo gli autori consigliano l'integrazione di strategie innovative (come quella di riscaldamento localizzato delle persone e non dell'intero ambiente) al fine di preservare le opere d'arte, garantire il comfort ai visitatori e mantenere i consumi contenuti.

Simile approccio viene presentato da Costanzo et al. [35] ed ha come oggetto di studio la Sala "dei Baroni" del trecentesco palazzo Chiaramonte detto Steri, attualmente adibita ad aula magna dell'Università di Palermo. La ricerca è stata condotta attraverso una campagna di monitoraggio volta specialmente alla conservazione dei 440 metri quadri di dipinti a tempera su legno del soffitto, rappresentanti storie bibliche, cavalleresche e mitologiche. L'obiettivo dello studio è quello di valutare la storia climatica e dunque le migliori condizioni ambientali ai fini della conservazione dei dipinti, con il fine ulteriore di trovare un bilanciamento tra conservazione delle opere e comfort termo-igrometrico degli utenti.

Sempre sulla stessa scia lo studio di de Santoli et al. [37] sulla Rocca di Vignola nella valle del Panaro, in provincia di Modena. Anche questo studio è finalizzato alla conservazione degli affreschi ma, a differenza dei due lavori precedentemente citati, in questo caso alla campagna di monitoraggio delle condizioni interne è stata affiancata una simulazione CFD, al fine di

determinare l'efficienza di un sistema meccanico ad aria installato con lo scopo di ridurre il deterioramento delle opere d'arte.

Altro studio che utilizza la CFD è quello condotto da Balocco [40] sul Salone dei Duecento di Palazzo Vecchio a Firenze. In questo studio vengono messe in risalto le potenzialità dell'utilizzo di un modello numerico dettagliato, calibrato su misurazioni reali, che permette di simulare le variazioni e l'interazione tra le condizioni microclimatiche interne ed esterne. Il comportamento termo-fisico dell'edificio viene considerato in relazione all'utilizzo dei sistemi tecnologici di illuminazione, di condizionamento e alla presenza dei visitatori, ed è finalizzato alla ricerca del comfort e alla conservazione delle opere d'arte.

Sempre di Balocco & Grazzini [42] lo studio condotto su Palazzo Marchese a Palermo, in cui una simulazione CFD, validata con misure sperimentali, viene condotta con lo scopo di comprendere il funzionamento di un sistema di raffrescamento passivo non più in uso, ottenuto attraverso la comunicazione con dei locali ipogei. Lo studio conferma l'efficacia dell'antico sistema di ventilazione naturale nell'edificio, e ha l'obiettivo di offrire nuovi spunti progettuali in termini di raffrescamento passivo e di incoraggiare la riscoperta e la riattivazione di questi sistemi, spesso dimenticati, in vari edifici storici.

Lo studio condotto da Ascione et al. [63] su Palazzo dell'Aquila Bosco-Lucarelli a Benevento, ospitante alcuni uffici ed aule dell'Università del Sannio, presenta una vasta gamma di tecniche di analisi: gli autori utilizzano un modello dinamico "multi-zona", calibrato tramite misurazioni ed indagini endoscopiche sulle pareti, al fine di individuare il miglior scenario di retrofit energetico in termini di comfort e risparmio. Tale studio viene poi implementato nel 2017 dai medesimi autori [197], estendendo l'approccio di diagnosi applicata alle murature storiche a livello multidisciplinare.

Un altro studio, che si focalizza sulla progettazione degli impianti HVAC per fini di comfort e conservazione delle opere d'arte, è quello condotto da Corgnati & Perino [190] sulla Sala del Senato di Palazzo Madama a Torino. Anche in questo caso viene utilizzato un modello CFD, che permette di determinare una accurata distribuzione spaziale delle temperature all'interno della sala sia durante il riscaldamento che durante il raffrescamento, ottenuti entrambi mediante HVAC. L'obiettivo dello studio è di raggiungere il controllo microclimatico interno integrando l'impiantistica al comportamento passivo dell'edificio.

Altra ricerca che ha come oggetto di studio un edificio universitario è quella condotta da Schibuola et al. [191] sul complesso dei Tolentini a Venezia, sede del Rettorato e altri luoghi amministrativi dell'Ateneo, in cui gli autori propongono l'integrazione di un sistema a pompe di calore geotermiche, considerato da loro particolarmente adatto in ambito storico ed in particolari

in terreni umidi e per questo maggiormente conduttivi come quelli del caso analizzato.

Gagliano et al. portano avanti due progetti a Catania, uno che studia la Villa San Saverio [192] e l'altro la Casa del Portuale [67]. La peculiarità di questi autori è quella di dare grande importanza allo studio dell'inerzia termica degli edifici storici e la sua influenza sulle prestazioni energetiche. Di rilevante importanza lo studio condotto sulla Villa San Saverio, un complesso ottocentesco che ad oggi ospita l'Università di Catania, il cui obiettivo è la caratterizzazione del comportamento termico di edifici massicci che sfruttano l'inerzia termica combinata alla ventilazione naturale. La metodologia proposta è una campagna sperimentale di misurazione condotta nella stagione estiva, al fine di determinare i fattori di ritardo e sfasamento delle pareti perimetrali ad elevata inerzia termica. I risultati dimostrano come, controllando e minimizzando i guadagni interni e solari, l'effetto sinergico di masse termiche e ventilazione notturna permette di controllare le condizioni di comfort interne senza l'utilizzo di impianti di condizionamento. Questo vale a dire che in clima mediterraneo la presenza di strutture massive, adeguatamente ventilate, può essere sufficiente per garantire buone prestazioni energetiche durante la stagione estiva, senza la necessità di interventi invasivi sull'involucro dell'edificio o di integrazione impiantistica HVAC.

Un approccio differente è quello portato avanti da Ascione et al. [193]. L'obiettivo di questa ricerca è quello di fornire un sistema olistico per la progettazione del rinnovamento energetico degli edifici storici, in grado di integrare standard e metodologie idonei. Il caso di studio proposto è Palazzo Penne, costruito a Napoli all'inizio del 1400, il quale si presta bene come esempio applicativo della metodologia proposta in quanto necessita interventi di restauro ed adeguamento energetico in relazione ad un cambio di destinazione d'uso. L'intervento proposto agisce principalmente sul miglioramento delle prestazioni dell'involucro (finestre, isolamento, etc.), rispettando i criteri di intervento minimo, conservazione del valore storico esistente, compatibilità delle tecnologie e dei materiali utilizzati nel restauro e la reversibilità degli interventi.

Sempre di Ascione et al. [194] lo studio condotto sul Centro Congressi, datato 1928, dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. Gli autori si pongono l'obiettivo di suggerire una strategia di retrofit energetico, efficace e compatibile con gli alti valori naturali e storici del sito. In dettaglio, viene analizzato l'impatto delle possibili misure di efficienza energetica e simulate le conseguenze del retrofit basato principalmente sulla profonda ristrutturazione del sistema HVAC e l'installazione di un impianto fotovoltaico.

Di Gagliano et al. [198] lo studio sperimentale sulla Caserma Gaetano Abela di Siracusa, datata 1735. Lo scopo di questo lavoro è valutare il comportamento termico di un edificio massivo

durante il periodo estivo mediante la misurazione della temperatura interna delle pareti e dell'aria in due stanze, una sul lato est ed una sul lato ovest dell'edificio, attraverso due profili: uno senza ventilazione notturna, l'altro mediante ventilazione notturna ottenuta aprendo le finestre dalle 20:00 alle 8:00. Il comfort termico nei due uffici è stato valutato utilizzando gli indici PMV e PPD. I ricercatori affermano che l'elevata inerzia termica delle masse combinata alla ventilazione naturale riduce la temperatura interna durante il periodo notturno; tuttavia, pur fornendo una migioria in termini di abbassamento di temperature, tale strategia passiva risulta insufficiente per garantire condizioni di comfort termico durante le ore diurne.

Gli studi condotti da Ciampi et al. [195] sull'Abbazia di S. Lorenzo ad Septimum ad Aversa e da Giuliani et al. [196] sul Palazzo d'Accursio, attualmente sede del municipio di Bologna, rappresentano altri due esempi applicativi di retrofit basato su analisi dinamiche che forniscono una previsione dei consumi e la fattibilità economica.

Di rilevante interesse alcuni lavori condotti all'interno della *Special Issue*⁹ sul progetto di riqualificazione degli edifici storici, che hanno come caso di studio dei palazzi di particolare interesse storico-architettonico, come il 700esco Palazzo Fuga di Napoli [199], il Palazzo Ex-INPS di Benevento del 1927 [200], il 600esco Albergo dei Poveri di Genova [201], il Palazzo Battaglia di Ragusa [202], ricostruito in stile Barocco nel '700, e il piacentino Castello medievale di Zena [203], ristrutturato negli anni '70.

Altri studi sono principalmente focalizzati sull'ottimizzazione di modelli dinamici per la simulazione delle performance energetiche di palazzi storici utilizzati come uffici, istituzioni o luoghi per attività terziarie [204] [205] [206], spesso ai fini della riqualificazione o dell'integrazione di avanzati sistemi HVAC [207].

Per quanto riguarda gli edifici scolastici analizzati, anche in questo caso il primo studio viene effettuato dagli italiani Butera et al. [27] sul tema dell'efficientamento energetico di 29 edifici storici scolastici localizzati a Palermo. La ricerca mostra che, in virtù delle caratteristiche degli edifici, del clima mite e del profilo di occupazione, la migliore soluzione a livello di risparmio economico ed energetico è riscontrabile in un sistema di riscaldamento adeguatamente controllato.

Un secondo studio applicato ad un edificio scolastico emerge anni dopo, nel 2002, con l'indagine svolta da Hanna [208] nella scuola delle arti di Glasgow, dove attraverso una serie di

⁹ *Historic, historical and existing buildings: designing the retrofit. An overview from energy performances to indoor air quality, Energy and Building, Volume 95, Pages 1-218 Edited by Francesca Romana d'Ambrosio, Livio Mazzarella, Piercarlo Romagnoni.*

misurazioni e questionari viene valutato il comfort visivo, acustico e termico degli studenti.

Molti degli studi hanno come obiettivo la riqualificazione energetica degli edifici scolastici, con l'obiettivo di determinare la migliore strategia in termini energetici ed economici [209] [53] [210] [211] [109] [212] [213], proponendo spesso sistemi di controllo innovativi per la gestione del comfort e la riduzione dei consumi [214].

Merita una nota di riguardo una delle ricerche condotta all'interno del progetto internazionale *School of the Future*, all'interno del settimo programma quadro dell'Unione Europea. All'interno di questo progetto internazionale sono stati presentati alcuni esempi dimostrativi di riqualificazione energetica di scuole in quattro Nazioni indicative di gran parte delle aree climatiche europee: Danimarca, Germania, Norvegia e Italia¹⁰. L'obiettivo del progetto è quello di sviluppare una panoramica sulle tecnologie disponibili per il retrofit degli edifici scolastici, compreso il loro impatto sulle prestazioni energetiche e sulla qualità dell'ambiente interno. Lo *screening* fornisce anche importanti informazioni sull'impatto economico di queste tecnologie nei diversi climi e nelle varie tipologie di scuole. L'obiettivo del progetto è quello di diffondere i risultati delle ricerche nei vari comuni europei, al fine di divenire strumento di supporto per i progettisti nella scelta delle strategie di retrofit degli edifici scolastici. In particolare, la ricerca che si vuole evidenziare è quella condotta sulla scuola primaria norvegese [55] [215] del 1914, in cui si affronta il tema della riqualificazione dell'involucro nel rispetto del valore storico delle facciate dell'edificio e si presenta la possibilità di integrare impianti di generazione geotermica. Altri studi relativi agli edifici scolastici sono invece focalizzati sul risparmio energetico ottenuto mediante il contributo dell'illuminazione naturale, che oltre a ridurre i consumi contribuisce a migliorare il comfort degli utenti. Questo tema è cruciale tanto negli edifici scolastici [216] [217], quanto negli uffici [218] [219] [220], ovvero in tutti i luoghi di lavoro in cui il comfort visivo diventa imprescindibile e l'illuminazione artificiale arriva a livelli di consumo e costi considerevoli.

Alcune delle ricerche condotte su uffici hanno come obiettivo quello di confrontare le performance energetiche degli edifici storici e di quelli di recente costruzione [221] [222].

Svariate altre ricerche si focalizzano su uffici e luoghi di attività terziarie, condotte negli ultimi anni, indagando le performance termo-igrometriche [223] [224] e proponendo, talvolta, scenari di retrofit energetico [225] [226].

¹⁰ Per completezza si riportano gli estremi bibliografici delle ricerche condotte in Danimarca [368], Germania [385] e Italia [68], che non sono state inserite nella *review* poiché i casi di studio sono edifici costruiti dopo il 1945.

Tra questi, si distinguono lo studio svolto da Forgiarini Rupp & Ghisi [227], in cui viene indagato il comfort in condizioni passive all'interno di un ufficio Brasiliano mediante questionari sottoposti agli utenti, e quello condotto dagli italiani Belleri et al. [228] sulla riqualificazione di un mercato a Valladolid, in cui al centro del progetto vengono poste le strategie di raffrescamento ventilativo naturale e ibrido, mediante le quali si arriva a un risparmio energetico del 40% rispetto ad un sistema totalmente meccanico.

Anno	Autori	Nazione in cui lavorano gli autori	Localizzazione edificio	Anno di costruzione	Tecnica di analisi
1985	F. Butera et al. [27]	Italia	Italia		Simulazione
2001	M. A. Naga & Y. Elsheshtawy [221]	Emirati arabi uniti	Emirati arabi		Indagine
2002	R. Hanna [208]	Inghilterra	Inghilterra	1909	Monitoraggio
2004	D. Camuffo et al. [33]	Italia	Italia	1345	Monitoraggio
2005	S. Costanzo et al. [35]	Italia	Italia	1307	Monitoraggio
2006	L. de Santoli et al. [37]	Italia	Italia	1178	CFD, Monitoraggio
2007	C. Balocco [40]	Italia	Italia	1299	CFD
2009	C. Balocco & G. Grazzini [42]	Italia	Italia	1300	CFD, Monitoraggio
2011	F. Ascione et al. [63]	Italia	Italia	1800	Monitoraggio, Simulazione
2013	S.P. Corgnati & M. Perino [190]	Italia	Italia	1848	CFD
2013	P. Nunes et al. [222]	Portogallo	Portogallo	1800, 1996	Simulazione, Monitoraggio
2013	L. Schibuola et al. [191]	Italia	Italia	1600	Simulazione
2014	A. Gagliano et al. [192]	Italia	Italia	1880	Monitoraggio, Simulazione
2014	A. Gagliano et al. [67]	Italia	Italia	1948	Simulazione
2014	L. de Santoli et al. [209]	Italia	Italia	1900	Simulazione
2014	K. Buvik et al. [55]	Norvegia	Norvegia	1914	
2015	E. Stocker et al. [53]	Austria	Austria		Simulazione
2015	M. Ghasempourabadi et al. [218]	Canada, Iran	Iran		Simulazione
2015	M. Tahsildoost & Zomorodian [210]	Iran	Iran		Monitoraggio, Simulazione
2015	G. Ciampi et al. [219]	Italia	Italia	1600	Monitoraggio, Simulazione
2015	F. Ascione et al. [193]	Italia	Italia	1400	Simulazione
2015	G. Ciampi et al. [195]	Italia	Italia	1600	Monitoraggio, Simulazione
2015	C. Marinosci et al. [211]	Italia	Italia	1930	Simulazione
2015	P. Lassandro et al. [216]	Italia	Italia	1920	Monitoraggio, indagine
2015	S.N. Kamaruzzaman et al. [220]	Malesia, Inghilterra	Malesia		Simulazione
2015	K. Buvik et al. [215]	Norvegia	Norvegia	1914	
2015	S.A. Ghita & T. Catalina [229]	Romania, Olanda	Romania		Monitoraggio, indagine
2015	C.D. Şahin et al. [226]	Turchia, Svezia	Turchia	1800	Monitoraggio, Simulazione
2015	L. Bellia et al. [199]	Italia	Italia	1700	Monitoraggio, Simulazione
2015	F. Ascione et al. [200]	Italia	Italia	1927	Monitoraggio, Simulazione
2015	G. Franco et al. [201]	Italia	Italia	1800	Simulazione
2015	D. Milone et al. [202]	Italia	Italia	1700	Indagine
2015	A. Alongi et al. [203]	Italia	Italia	1200	Simulazione
2015	Ö. Göçer et al. [187]	Turchia, Usa			Indagine
2015	F. Ascione et al. [194]	Italia	Italia	1928	Simulazione
2015	A. Gagliano et al. [198]	Italia	Italia	1735	Monitoraggio
2016	A. L. Pisello et al. [204]	Italia	Italia	1700	Simulazione
2016	L. Mauri [205]	Italia	Italia	1860	Simulazione
2016	A. Magrini et al. [206]	Italia	Italia	1300, 1900	Indagine
2016	P. Blecich et al. [186]	Croazia, Slovenia	Croazia	1200	Simulazione
2016	S.S. Korsavi et al. [217]	Iran	Iran		Monitoraggio, Simulazione
2016	M. Giuliani et al. [196]	Italia, Usa	Italia	1886	Monitoraggio, Simulazione, Termografia
2016	G. Semprini et al. [212]	Italia	Italia	1935	Monitoraggio
2016	D. Bakonyi & G. Dobszay [225]	Ungheria	Ungheria	1865	Simulazione
2017	R. Forgiarini & E. Ghisi [227]	Brasile	Brasile		Indagine
2017	H. Ma et al. [223]	Cina			Indagine
2017	A.M. Elharidia et al. [224]	Egitto	Egitto		Monitoraggio, Simulazione
2017	Y. Yoshida et al. [214]	Giappone	Giappone		Simulazione
2017	G. Salvalai et al. [213]	Italia	Italia		Simulazione
2017	E. Genova et al. [189]	Italia	Italia	1400, 1700	Indagine, Simulazione
2017	A. Belleri et al. [228]	Italia	Spagna	1882	Simulazione
2017	F. Ascione et al. [197]	Italia	Italia	1800	Simulazione
2017	B. Nastasi & U. Di Matteo [207]	Italia	Italia	1930	Indagine
2017	A. Sharma [188]	India	India	1700	Indagine

Tab. 1.2: Palazzi, uffici e luoghi di istruzione.

1.3.3 *Uso religioso*

Il 10% delle ricerche analizzate che riguardano aspetti energetici del patrimonio storico, riportate in Tabella 1.3., ha come oggetto di studio gli edifici religiosi.

Risulta interessante innanzitutto notare come il 90% delle ricerche dedicate a questo tipo di edifici siano state condotte in Europa. I casi di studio sono generalmente chiese o complessi religiosi del periodo compreso tra il XII e il XVII sec. e dunque spesso le ricerche hanno come obiettivo quello della conservazione delle opere d'arte al loro interno [32] [36] [38] [230] [231] [232] [233] [234] o la conservazione dell'edificio stesso dal degrado [235] [236] [29] [30] [237] [238] [239] [240].

Alcune tra queste ricerche incentrano la loro attenzione sull'integrazione di sistemi di riscaldamento HVAC [59] [241] [242] [243], come lo studio condotto da Camuffo et al. [230] sulla chiesa di Santa Maria Maddalena in Rocca Pietore sulle dolomiti. Lo studio si inserisce all'interno del progetto europeo *Friendly-heating*¹¹ che si pone l'obiettivo di trovare un equilibrio tra le esigenze di comfort termico e quelle di conservazione delle opere d'arte, spesso in conflitto tra loro. La proposta della ricerca è quella di installare dei pannelli radianti a bassa temperatura integrati nelle panche, al fine di garantire un microclima confortevole localizzato e preservare le opere d'arte dal deterioramento indotto da sistemi di riscaldamento tradizionali.

Uno studio analogo è stato condotto in tempi recenti da Aste et al. [244] sulla Basilica di Santa Maria di Collemaggio a L'Aquila. Il lavoro conferma che il riscaldamento integrato nelle panche è una soluzione efficace per le chiese storiche, poiché combina buoni livelli di comfort locale ad un notevole risparmio energetico, con un impatto pressoché nullo sulle opere d'arte e le strutture dell'edificio. Lo studio dimostra i vantaggi dell'utilizzo, in particolare, di un efficiente ed innovativo sistema idronico accoppiato ad una pompa di calore geotermica, progettato con il supporto di un modello numerico CFD.

Un'altra ricerca focalizzata sull'integrazione degli impianti HVAC è quella condotta da Maahsen & Fabbri [64] su due casi di studio localizzati a Torino: il Convento di S. Croce, convertito in aule universitarie, e la Chiesa e il Coro di S. Pelagia. L'obiettivo della ricerca è quello di valutare interventi di restauro e retrofit energetico su edifici del patrimonio, mettendone in evidenza le difficoltà comuni. Data la rapidissima evoluzione degli impianti HVAC, risulta già necessaria la sostituzione di quelli implementati nei recenti anni '80 e '90. In

¹¹ *Friendly-heating: comfortable to people and compatible with conservation of artworks preserved in churches*, "Riscaldamento accogliente: confortevole per le persone e compatibile con la conservazione di opere d'arte conservate nelle chiese" N.d.T.

tale contesto, gli interventi di restauro hanno bisogno di accurate valutazioni in termini di efficienza energetica, di reversibilità e di rispetto del patrimonio.

Svariati studi utilizzano lo strumento della CFD con svariati obiettivi. D'Agostino et al. [231] [232] conducono una ricerca approfondita sulla Cripta della Cattedrale di Lecce, con lo scopo di risolvere il problema del deterioramento interno della chiesa, costituito principalmente da efflorescenze legate a condizioni climatiche interne non adatte. L'utilizzo della simulazione CFD, validata da misurazioni sperimentali, permette in questo caso di determinare gli scenari più efficaci di ventilazione naturale che assicurino il microclima con gradienti termici più bassi e flussi d'aria più appropriati ai fini della preservazione del monumento.

Tazky & Sedlakova [238] utilizzano invece un modello CFD per affrontare il problema dell'umidità di risalita nella Chiesa slovacca Gemersky Jablonec del XIII sec., con lo scopo di determinare l'efficacia di una soluzione che preveda la realizzazione di canali d'aria ventilati alla base delle pareti perimetrali.

Di particolare interesse lo studio condotto da Petrozzi et al. [245] sul funzionamento del "villaggio della sostenibilità" realizzato recentemente dal centro di ricerca sulle biomasse dell'Università di Perugia nel contesto storico del monastero risalente al X sec. di Rocca di S. Apollinare vicino Marsciano (PG). Il complesso, recentemente restaurato ed adibito a scuola estiva, è stato impostato sul concetto di economia circolare, in cui avviene la completa gestione di un piccolo impianto a biogas, dalla coltivazione alla generazione di energia.

Altri studi si occupano di efficienza energetica e comfort mediante modelli di simulazione delle performance termo-igrometriche [246] [247] [90] [91], includendo a volte la ventilazione naturale [248] o il controllo dell'umidità [249], indagando aspetti metodologici o misurando l'efficacia degli interventi di restauro [250] [251] [252].

Anno	Autori	Nazione in cui lavorano gli autori	Localizzazione edificio	Anno di costruzione	Tecnica di analisi
1995	G.N. Tiwari et al. [246]	India	India	1050	Simulazione
2000	A. Bernardi et al. [32]	Italia, Bulgaria	Bulgaria	1200	Monitoraggio
2001	A. C. Iñigo & S. Tavera [235]	Spagna	Spagna	1300	Monitoraggio
2002	N. Cardinale & F. Ruggiero [236]	Italia	Italia	1500	Monitoraggio
2004	R. Cataldo et al. [29]	Italia	Italia	1080	Monitoraggio
2006	G. Loupa et al. [36]	Cipro	Cipro	850, 1650	Monitoraggio
2007	L. Bencs et al. [38]	Belgio, Ungheria, Olanda	Italia	1400	Monitoraggio
2007	L. Samek et al. [30]	Polonia, Belgio	Polonia	1736	Monitoraggio
2007	B. İpekoglu et al. [240]	Turchia	Turchia	1600	Monitoraggio
2008	P. Zitek & T. Vyhlidal [249]	Repubblica Ceca	Repubblica Ceca	1365	Simulazione
2010	D. Camuffo et al. [230]	Italia, Finlandia, Polonia	Italia	1350, 1450	Monitoraggio
2013	A. Maahsen & K. Fabbri [64]	Italia	Italia	1600	
2013	T. Cardinale et al. [250]	Italia	Italia	1600	
2013	D. D'Agostino et al. [231]	Italia	Italia	1114	CFD, Monitoraggio
2014	D. D'Agostino & P. Congedo [232]	Italia	Italia	1114	CFD, Monitoraggio
2014	G. Woroniak & J. Piotrowska [59]	Polonia	Polonia	1890, 1902	Simulazione
2014	H.E. Silva & F. Henriques [251]	Portogallo	Portogallo	1200	Monitoraggio, Simulazione
2014	A.M.T. Martins & J.S. Carlos [252]	Portogallo	Portogallo	1653	Simulazione
2014	M.I. Martínez-Garrido et al. [247]	Spagna	Spagna	1200	Monitoraggio
2014	M.J. Varas-Muriel et al. [241]	Spagna	Spagna	1200	Monitoraggio
2015	K. Maroy et al. [233]	Belgio	Belgio	1500	Monitoraggio
2015	M. Napp & T. Kalamees [242]	Estonia	Estonia	1300	Monitoraggio, Simulazione
2015	H. E. Silva & F. Henriques [237]	Portogallo	Portogallo	1200	Monitoraggio, Simulazione
2015	L. Tazky & A. Sedlakova [238]	Slovacchia	Slovacchia	1200	CFD
2016	H. Xu et al. [90]	Cina	Cina		Monitoraggio
2016	J. Wang et al. [91]	Cina	Cina		Monitoraggio
2016	M. Napp et al. [243]	Estonia	Estonia	1200	Monitoraggio, Simulazione
2016	N. Aste et al. [244]	Italia	Italia	1288	CFD, Monitoraggio
2016	C.M. Muñoz-González et al. [239]	Spagna	Spagna	1500	Monitoraggio, Simulazione
2016	S. M. Pinilla et al. [234]	Spagna	Spagna	1400	Monitoraggio, simulazione
2016	A. Petrozzi et al. [245]	Italia	Italia	1030	Monitoraggio
2017	A. Hayati et al. [248]	Svezia	Svezia	1200, 1800	Monitoraggio, Simulazione

Tab. 1.3: Edifici storici ad uso religioso.

1.3.4 Musei, biblioteche e teatri

L'8% delle ricerche analizzate è incentrato su musei, biblioteche e teatri, come presentato in Tabella 1.4.

Per questa categoria può essere condotto un discorso analogo a quello fatto precedentemente per i palazzi storici: la totalità delle ricerche è difatti svolta in Europa (ad esclusione di un solo studio condotto in Argentina [83]) ed una percentuale molto alta si localizza in Italia (57%). Gli edifici studiati appartengono al periodo che va dal XIV al XX sec., dunque mediamente più recenti degli edifici appartenenti alla categoria religiosa.

Gran parte di queste ricerche hanno come obiettivo la conservazione delle opere d'arte all'interno degli edifici [31] [106] [253] [34] [254] [255] [256].

Tra questi si distingue lo studio condotto da Fabbri & Pretelli [254] sulla Biblioteca Malatestiana di Cesena, edificio '400esco che ospita tutt'oggi libri e manoscritti originali. Gli autori vogliono promuovere una valutazione del microclima dell'edificio basata su di un approccio che mette in primo piano il patrimonio e la sua conservazione, andando contro la tendenza diffusa di occuparsi principalmente del miglioramento del comfort degli utenti. I risultati della ricerca, dedotti analizzando le misurazioni ottenute mediante una campagna di monitoraggio sperimentale, mostrano come l'assenza dei sistemi HVAC non pregiudichi la conservazione delle opere contenute nella biblioteca, anzi ne favorisca la salvaguardia.

Un altro studio rilevante è quello effettuato da Balocco et al. [255] sulla Biblioteca Palatina di Parma. L'approccio utilizzato prevede una prima fase di simulazione numerica CFD, per la risoluzione dei campi di velocità dell'aria, dell'umidità e della temperatura, ed una seconda fase di elaborazione dei risultati. La biblioteca viene analizzata in due scenari (stato di fatto e proposta di integrazione HVAC), con l'obiettivo di valutare se le condizioni microclimatiche interne possano essere più o meno favorevoli alla crescita e allo sviluppo dei microrganismi, responsabili del deterioramento della carta dei libri.

Altro studio che utilizza un software CFD è quello condotto da Balocco & Grazzini [39] sul Salone dei Duecento di Palazzo Vecchio a Firenze. L'obiettivo della ricerca è quello di valutare l'inserimento di un impianto HVAC all'interno della sala, tema importante quando l'edificio è un museo e contemporaneamente un'opera d'arte. Combinando il risparmio energetico al concetto di minimo impatto e reversibilità, la soluzione studiata attraverso il modello numerico ed infine proposta è basata su di un pavimento radiante mobile.

Molte delle ricerche sui musei utilizzano strumenti di indagine statistica e di simulazione spesso accoppiati a campagne di monitoraggio, per valutare le condizioni termo-igrometriche interne in

termini di comfort ed efficienza energetica [257] [258] [259] [260] [261] [262] [263] [264], proponendo a volte metodologie di studio esportabili a vari casi [265] [266].

Come nel paragrafo 1.3.2 si fa riferimento nuovamente ad alcuni lavori condotti all'interno della *Special Issue*¹² sul progetto di riqualificazione degli edifici storici, che hanno come caso di studio in questo caso edifici storici adibiti a musei, come il museo "La Specola" di Firenze nello studio di F. Sciurpi et al. [267], la Fondazione Musei Senesi nel *paper* di M. Rota et al. [268] e il museo bavarese Glentleiten analizzato da S. Raffler et al. [269]. In questi studi viene data particolare attenzione alle condizioni interne di temperatura dell'aria e temperatura superficiale delle pareti, ai fini dell'ottimizzazione della gestione dei musei in termini di comfort, efficienza e conservazione delle opere.

Infine, gli studi condotti da Maahsen & Simonetti [270] e Ricciardi & Buratti [271] rappresentano due esempi di ricerca applicata a teatri ed auditorium, luoghi che necessitano di uno studio profondo ai fini della richiesta del comfort ambientale e dell'efficienza energetica poiché trovandosi spesso all'interno di strutture antiche riutilizzate, raramente sono esempi virtuosi per il consumo di energia.

¹² *Historic, historical and existing buildings: designing the retrofit. An overview from energy performances to indoor air quality, Energy and Building, Volume 95, Pages 1-218 Edited by Francesca Romana d'Ambrosio, Livio Mazzarella, Piercarlo Romagnoni.*

Anno	Autori	Nazione in cui lavorano gli autori	Localizzazione edificio	Anno di costruzione	Tecnica di analisi
1999	D. Camuffo et al. [31]	Italia, Belgio, Austria, Inghilterra, Nuova Zelanda	Italia	1582	Monitoraggio
2000	K.A. Papakonstantinou et al. [257]	Grecia	Grecia	1889	CFD
2001	D. Camuffo et al. [106]	Italia, Belgio, Austria, Inghilterra, Nuova Zelanda	Europa	1500, 1800	Monitoraggio
2003	A.M. Papadopoulos et al. [258]	Grecia	Grecia	1344	Simulazione
2004	K. Gysels et al. [253]	Belgio, Italia, Austria	Belgio	1873	Monitoraggio
2005	M. La Gennusa et al. [34]	Italia	Italia	1400	Monitoraggio
2006	C. Balocco & G. Grazzini [39]	Italia	Italia	1495	CFD
2007	C. Balocco & R. Calzolari [259]	Italia	Italia	1300	Simulazione
2011	A. Maahsen & M. Simonetti [270]	Italia	Italia	1700, 1900	
2011	S. López-Aparicio et al. [256]	Norvegia, Rep. Ceca	Repubblica Ceca	1722	Monitoraggio
2012	R. Farreny et al. [260]	Spagna	Spagna		Indagine, Simulazione
2014	F. Wang et al. [263]	Inghilterra	Scozia	1855	Monitoraggio, Simulazione
2014	K. Fabbri & M. Pretelli [254]	Italia	Italia	1450	Monitoraggio
2015	M. de la Paz Diulio et al. [83]	Argentina	Argentina	1906	Monitoraggio, indagine
2015	G. Litti et al. [264]	Belgio	Belgio	1500	Monitoraggio, termografia
2015	P. Ricciardi & C. Buratti [271]	Italia	Italia	1773	Monitoraggio, indagine
2015	F. Scieurpi et al. [267]	Italia	Italia	1520	Monitoraggio, Simulazione
2015	M. Rota et al. [268]	Italia	Italia		Indagine
2015	S. Raffler et al. [269]	Germania	Germania	1729	Monitoraggio
2015	S. E. Chatoutsidou et al.	Norvegia, Rep Ceca, Grecia	Repubblica Ceca	1722	Monitoraggio
2015	G. Litti et al.	Italia, Belgio			Indagine
2015	R.P. Kramer et al.	Olanda	Olanda	1700	Monitoraggio, simulazione
2016	L. de Santoli et al. [261]	Italia	Italia	1612	Indagine, Simulazione
2016	C. Balocco et al. [255]	Italia	Italia	1761	CFD, Monitoraggio
2016	E. Lucchi [265]	Italia	Italia		Indagine
2016	E. Lucchi [266]	Italia	Italia		Indagine
2016	R.P. Kramer et al. [262]	Olanda	Olanda	1682	Monitoraggio

Tab. 1.4: Musei, biblioteche e teatri.

1.3.5 Spazi urbani

Il 3% delle ricerche analizzate si focalizza sugli spazi urbani caratterizzati da particolare valore storico e per questo considerati appartenenti al patrimonio, come descritto precedentemente. Molti di questi studi sono condotti in Italia, Cina e Inghilterra, Nazioni che si distinguono per numero di ricerche condotte su aggregati residenziali nei quali viene già inclusa la valutazione dello spazio urbano circostante [145] [49] [163]. Altri studi si focalizzano sugli aspetti di illuminazione naturale e comfort luminoso nei complessi urbani storici [272] [273].

Di seguito in Tabella 1.5 vengono riportati gli studi che vengono dedicati integralmente allo studio dello spazio urbano, che analizzano fenomeni di raffrescamento dovuti alla ventilazione naturale alla scala urbana [44] [274], fornendo simulazioni dettagliate degli effetti microclimatici relativi all'assetto urbano come l'effetto albedo [45], con particolare attenzione al fenomeno di surriscaldamento locale nelle aree urbano definito "isola di calore" [275].

Risulta interessante notare che molti degli studi che si stanno diffondendo negli ultimi anni adottano strumenti di modellazione numerica CFD accoppiata a campagne sperimentali [274] [45].

Anno	Autori	Nazione in cui lavorano gli autori	Localizzazione edificio	Anno di costruzione	Tecnica di analisi
2003	C. Ratti et al. [272]	Inghilterra	Marocco		Simulazione
2012	L. Tang et al. [44]	Cina, Inghilterra, Germania	Cina		CFD
2013	N. Cardinale et al. [145]	Italia	Italia	1600	Monitoraggio, Simulazione
2014	L. Tang et al. [274]	Cina, Inghilterra	Cina		CFD, Monitoraggio
2015	F. Salata et al. [45]	Italia	Italia	1500	CFD, Monitoraggio
2016	C. S. P. López et al. [273]	Italia, Svizzera	Svizzera		Simulazione
2017	A. Salvati et al. [275]	Spagna, Italia	Spagna		Monitoraggio, Simulazione

Tab. 1.5: Spazi urbani.

1.3.6 Siti archeologici

Una nota di riguardo è dovuta a due ricerche effettuate non su edifici attualmente esistenti ma piuttosto sulla ricostruzione virtuale del funzionamento originario di architetture la cui testimonianza è rimasta ad oggi solo in termini di reperto archeologico.

Il primo è condotto da de Santoli & Mariotti [35] ed ha come oggetto di studio il tempio di Ercole Vincitore a Tivoli, dell'89 a.C. L'utilizzo di un modello numerico CFD permette la ricostruzione del sistema di controllo microclimatico basato sul raffrescamento passivo dell'aria attraverso gli ipogei della via Tecta, un tunnel sotterraneo di epoca romana che rappresenta la fine dell'antica via Tiburtina. La ricerca evidenzia le potenzialità della CFD nel simulare le performance di sistemi fortemente dipendenti dalla variabilità delle condizioni esterne.

Altro studio più recente è quello condotto da Gagliano et al. [104] sulle Terme romane dell'Indirizzo di Catania del 100 d.C. Il sistema di riscaldamento presente all'interno degli edifici termali rappresenta un esempio significativo dell'eccezionale livello tecnologico raggiunto dai Romani. Sebbene il funzionamento di questi impianti sia largamente conosciuto, viene comunque proposto un approccio multidisciplinare che simuli numericamente il comportamento dell'edificio, ricostruito virtualmente in 3D, con l'obiettivo di confermare le ipotesi preliminari di tipo qualitativo. La ricerca permette quindi di studiare vari scenari ipotizzati, di determinare il consumo medio di legno combustibile per il funzionamento del complesso e di dedurre le condizioni ambientali interne.

Anno	Autori	Nazione in cui lavorano gli autori	Localizzazione edificio	Anno di costruzione	Tecnica di analisi
2007	L. de Santoli & M. Mariotti [41]	Italia	Italia	89 a.C.	CFD
2017	A. Gagliano et al. [104]	Italia	Italia	100 d.C.	CFD

Tab. 1.6: Siti archeologici.

1.3.7 Altro

In Tabella 1.7 vengono riportati gli studi che non possono essere inclusi nella tassonomia precedentemente illustrata, in quanto presentano casi studio appartenenti ad altre tipologie oppure sono indagini generiche non applicate a casi studio specifici.

Tra questi, uno dei primi articoli del campo è quello di Prömmel [25] che affronta il problema dell'isolamento termico negli edifici storici; sempre su questo tema altri studi più recenti condotti mediante indagini generiche [52] [276] [58] [277], simulazioni [278] o campagne sperimentali in laboratorio [279].

Alcune di queste ricerche svolgono indagini generiche o *review* sull'architettura vernacolare [280] [85] [103] [281] [282] [283] [284] o sulle linee guida per l'efficientamento e la tutela degli edifici storici [285] [286] [287] [288] [289] [290].

Altri studi sono dedicati alle performance degli edifici, utilizzando svariate tecniche di analisi come la termografia [291], la CFD [292] oppure simulazioni combinate a campagne sperimentali di misurazione [279] [293] [294].

Numerosi sono inoltre gli studi sul comfort degli utenti [295] [296] [297] [298] [88] e sull'analisi dei consumi e l'integrazione degli impianti HVAC [299] [300] [301] [65] [66] [302] [303] [304].

Di particolare interesse lo studio condotto da Sibley & Sibley [305], in cui viene approfondito il tema del comfort luminoso mediante lo sviluppo di un prototipo per l'illuminazione naturale diurna all'interno di 67 hammam storici delle città del nord Africa, luoghi che spesso soffrono di scarsa illuminazione e ventilazione. Gli autori affermano che il loro prototipo (cupole di vetro inserite sulle coperture ed illuminazione Led alimentata a pannelli fotovoltaici) fornisce comfort durante le ore diurne e un'autonomia relativa all'illuminazione notturna fino ad 8 ore.

Altro lavoro di grande interesse è quello svolto da Pretelli et al. [66], che focalizzano l'attenzione sugli impianti tecnologici all'interno degli edifici storici. Gli autori affermano che, dalla nascita delle teorie sul restauro nel XIX sec., del tale tema è stato trattato in poche occasioni e ad oggi in molti edifici si trovano più generazioni di impianti tecnologici. Viene posta quindi l'attenzione sui sistemi finalizzati al riscaldamento degli ambienti e dell'acqua sanitaria, all'illuminazione e alla movimentazione di oggetti che fin da tempi remoti sono stati presenti negli edifici storici e rappresentano oggi una risorsa da tutelare e valorizzare. Gli autori sostengono quindi che negli interventi di restauro questo può avvenire attraverso la loro musealizzazione oppure attraverso la loro inclusione nel nuovo progetto degli impianti.

Infine, una ricerca di particolare interesse è quella condotta da Becchio et al. [276] che prende

come caso di studio un edificio abbandonato del complesso industriale dismesso INCET, Industria Nazionale Cavi Elettrici Torino, risalente alla fine dell'800. L'obiettivo degli autori è quello di fornire linee guida e strumenti per la riprogettazione di aree ex-industriali non solo nelle vicinanze di Torino, ma anche in altre regioni italiane ed europee.

Anno	Autori	Nazione in cui lavorano gli autori	Localizzazione edificio	Anno di costruzione	Tecnica di analisi
1978	A. Prömmel [25]	Germania			
1980	K. Johnsen [26]				
1997	G.S. Brager & R.J. de Dear [295]	Australia, Usa			Review
1991	A. V. Alp [280]	A. Saudita, Turchia			Indagine
1993	H. Al-Hinai et al. [283]	Inghilterra	Oman		Indagine
1994	K. Kimura [284]	Giappone	Giappone		Indagine
2002	E. Grinzato et al. [291]	Italia	Italia	1104	Termografia
2009	M. Abuku et al. [292]	Belgio, Danimarca			CFD
2010	S.N. Kamaruzzaman et al. [296]	Malesia	Malesia	1800, 1900	Indagine
2011	P.J. Godwin [285]	Inghilterra	Inghilterra		
2011	P. Keshtkaran [85]	Iran	Iran		
2011	S. Lagüela et al. [299]	Spagna			Termografia
2012	H.K. Yung & H.W. Chan [286]	Cina			
2012	K. Fabbri et al. [300]	Italia	Italia		Indagine
2013	K. Sterflinger et al. [52]	Austria			
2013	Z. Wu & J. Xu [301]	Cina	Cina		Indagine
2013	M. Sibley & M. Sibley [305]	Inghilterra	Marocco		
2013	A. Moschella et al. [65]	Italia	Italia		
2013	M. Pretelli et al. [66]	Italia	Italia	1500, 1900	Indagine
2014	J. Zagorskas et al. [278]	Lettonia, Lituania			Simulazione
2014	P. Johansson et al. [279]	Svezia, Norvegia	Svezia, Norvegia		Monitoraggio, Simulazione
2014	R.M. Ward, R. Choudhary [306]	Inghilterra	Inghilterra	1800, 1987	Simulazione
2015	L. de Santoli [287]	Italia			Indagine
2015	M. Krarti [307]	Usa	Kuwait		Indagine
2015	K. Kass et al. [288]	Lettonia			Indagine
2015	P.N. de Freitas & Guedes [297]	Portogallo	Portogallo	1758	Indagine
2015	L. Mazzarella [14]	Italia			Indagine
2015	M. Filippi [15]	Italia			Indagine
2015	E. Marra et al. [293]	Germania			Monitoraggio, simulazione
2016	P. Motealleha et al. [103]	Iran, Canada			Indagine
2016	C. Becchio et al. [276]	Italia	Italia		Indagine
2016	E. Kamendere et al. [58]	Lettonia	Lettonia		Indagine
2016	A. Blumberga et al. [290]	Lettonia	Lettonia	1890, 1940	Monitoraggio
2016	A. Alsabry [277]	Polonia			Indagine
2016	A. Martínez-Molina et al. [24]	Spagna			Review
2016	B. Kırbaş & N. Hızlı [281]	Turchia	Turchia		Indagine
2017	A.G. González et al. [308]	Belgio, Inghilterra			Indagine
2017	O.A.M. Bayoumi [282]	Egitto	Egitto		Indagine
2017	N. Ginks & B. Painter [302]	Inghilterra	Inghilterra		Indagine
2017	L. Pampuri et al. [303]	Italia, Svizzera			Indagine
2017	E. Lucchi [304]	Italia	Italia	1200, 1900	Indagine, Monitoraggio
2017	K. Kass et al. [289]	Lettonia	Lettonia		Indagine
2017	F. Jomehzadeh et al. [88]	Malesia, Iran	Iran		Review
2017	I. Sobhy et al. [294]	Marocco	Marocco		Monitoraggio, Simulazione, Termografia

Tab. 1.7: Altri studi.

2. Raffrescamento passivo negli edifici del patrimonio

2.1 Inquadramento

Nella tradizione costruttiva mediterranea si sono storicamente sviluppate e consolidate delle strategie progettuali ed accorgimenti volti a migliorare le condizioni di comfort, agendo tanto alla scala urbana quanto a quella dell'edificio.

La conoscenza delle fabbriche storiche, dei loro principi insediativi, caratteri topografici, geografici, tecniche costruttive e scelte materiche risulta uno studio necessario ai fini di comprendere la relazione tra insediamenti storici e ambiente.

Il patrimonio storico rappresenta di fatto una risorsa culturale e ambientale che tramanda i caratteri di identità e radicamento nei luoghi. In particolare, il bacino Mediterraneo, *medium terrae*, non è solo un luogo geografico ma un concetto ed una condizione, un reticolo di tratte, uno spazio dinamico di incontri. Nel mezzo di tre continenti, Europa, Asia e Africa, e tre “zolle culturali” in perenne movimento, l'Ebraismo, il Cristianesimo e l'Islam, ha nel tempo configurato nei suoi abitanti un'appartenenza e una estraneità, un'identità plurale e metamorfica. Al tempo stesso il *mare nostrum*, come veniva chiamato in epoca romana, è il luogo di interfaccia tra nord e sud, prossimo alla linea equatoriale, dove avviene l'incontro-scontro tra spinte contrapposte.

Sviluppatasi in un contesto di scambi e contaminazioni, l'architettura mediterranea è sempre stata al centro del dualismo locale-globale, cioè il confronto tra una realtà limitata e una civiltà più evoluta di valore universale, un equilibrio precario tra caratteri peculiari e culture dominanti. A differenza del globalismo contemporaneo, nel quale l'industrializzazione delle componenti e delle attività ha svincolato i modelli abitativi, formali e tecnologici dalle necessità locali, in passato le culture non erano caratterizzate dalla simultaneità dello scambio di informazioni ma dalla stratificazione temporale e dalla sedimentazione delle diversità, in un disordine omogeneo profondamente umano, multiforme, ovvero molteplice espressione delle singolarità.

L'architettura mediterranea ha storicamente trovato la sua definizione nel rapporto tra forma costruita e ambiente naturale, radicando la sua identità nella memoria collettiva e nelle esperienze locali, coinvolgendo aspetti culturali, religiosi e socio-economici.

Derivata da un continuo processo di perfezionamento empirico, l'architettura storicizzata rappresenta una sintesi tra forma e funzione e collega aspetti tettonici ad aspetti culturali, climatici, logistici, come la reperibilità dei materiali, e a quelli di necessario adattamento alle condizioni esterne.

Utilizzo delle risorse locali, sfruttamento intelligente del territorio e comfort interno degli spazi abitativi sono dei caratteri comuni del patrimonio edilizio storico.

“L’architettura mediterranea può essere oggi, più che mai, insegnamento di metodo, superamento dell’arbitrio, ricerca di essenzialità, pratica di risparmio e recupero ambientale...la sua universalità si può rintracciare nel modo con cui fornisce risposte adeguate a bisogni essenziali e in una ricerca di rigore che oggi si pone come fattore etico di risparmio contro gli eccessi del consumo, lo spreco delle risorse, lo sfruttamento indiscriminato del territorio...” [309].

Da questi presupposti, nel corso del tempo, è nata una vera e propria casistica di costruzioni, dei veri e propri archetipi bioclimatici, che delineano tipologie differenti in relazione all’area geografica e all’interazione con il contesto fisico e culturale. Possono definirsi archetipi bioclimatici quelle costruzioni o quegli elementi costruttivi il cui scopo è il controllo ambientale endoclimatico, in stretta relazione all’epoca e all’area geografica in cui si sono sviluppati e alle caratteristiche di interazione con il contesto fisico-culturale. [310]

L’area mediterranea vede la presenza di molteplici esempi sedimentatisi come modelli di controllo climatico, legati prevalentemente alla presenza di climi aridi o temperati, nei quali l’obiettivo principale è la protezione dal caldo in estate, stagione che presenta le condizioni più sfavorevoli. La ricerca del comfort ambientale, lontano da essere una mera questione prestazionale, è una costante di tutti i periodi storici, dalla cultura greco-romana a quella araba, con numerosi e interessanti sviluppi nel tempo. Per ricostruire e comprendere il funzionamento di questi semplici sistemi è necessario uno studio che coniughi aspetti storico-architettonici a quelli scientifici, al fine di indagare i fenomeni complessi per poi trarne considerazioni generali. Nel seguente paragrafo vengono riportati alcuni esempi famosi per i loro sistemi di controllo climatico e raffrescamento passivo; questi evidenziano come quell’esperienza, legata al dimensionamento degli spazi e delle aperture, all’uso sapiente dei materiali locali, alla valutazione delle correnti d’aria indotte da piccole differenze di temperatura, all’utilizzo dei venti, dell’acqua e delle essenze arboree, si sia nel tempo coagulata e sia stata tramandata.

2.2 Archetipi dell'area mediterranea

Parlando di architettura mediterranea, va inizialmente condotta un'analisi su quella che può definirsi area mediterranea. Non esiste una nozione di mondo mediterraneo universalmente accettata: essa infatti varia a seconda della prospettiva adottata.

Pur non avendo caratteri omogenei dal punto di vista geografico e morfologico, l'area che si affaccia sul bacino presenta delle uniformità relative al clima, alla flora e all'esposizione ai venti. Il clima, influenzato dalla presenza del bacino chiuso con temperature più elevate di quelle oceaniche, e le caratteristiche morfologiche ed orografiche determinano generalmente temperature miti e piogge concentrate prevalentemente nelle stagioni di transizione. Tuttavia si presentano fenomeni legati ad aspetti regionali che vanno a caratterizzare notevolmente gli aspetti climatici a livello locale, cosa che comporta una eterogeneità a livello ambientale quanto paesaggistico. [311]

A livello di insediamenti, fin dall'antichità, tutta l'area che si affaccia nel bacino mediterraneo è stata caratterizzata da un processo di addensamento lungo le coste, dovuto in parte all'attrazione verso i traffici marittimi, in parte alle caratteristiche meno favorevoli delle zone interne (montuose o desertiche). I Paesi possono distinguersi in quelli della riva nord (europei) e quelli della riva sud (afroasiatici), caratterizzati i primi da climi tendenzialmente umidi e temperati, i secondi da climi più aridi dovuti all'influenza dei caratteri sahariani.

2.2.1 Cenni sul mediterraneo meridionale

Nei climi aridi dell'area mediterranea nordafricana e mediorientale, gli archetipi più rappresentativi sono riconducibili a modelli in cui prevalgono caratteri dimensionali e di relazione con il luogo, attraverso l'adattamento al suolo, con cui l'edificio si confronta nell'atto della fondazione, e con il clima, attraverso gli elementi naturali come la luce, l'aria e l'acqua.

In un rapporto dialettico tra forma costruita e naturale, gli edifici sono configurati con un carattere non di dominio ma di adattamento e modifica verso le forze della natura, attraverso elementi costruttivi per il controllo della ventilazione naturale, in combinazione all'utilizzo dell'acqua per l'umidificazione dell'aria, alle grandi masse dell'involucro per lo smorzamento dell'escursione termica estiva e al controllo dell'irraggiamento solare.

La caratteristica principale dei sistemi insediativi tradizionali è l'integrazione di elementi diversi, in cui gli aspetti tecnici sono strettamente correlati a quelli strutturali, all'uso dei materiali, all'impiego di dispositivi del controllo ambientale, agli aspetti socio-culturali e alle istanze estetico-formali.

“L’ambiente naturale per l’arabo è il deserto. Esso ha determinato le sue abitudini, la sua visione della vita e la sua cultura. Egli è debitore del deserto della sua semplicità, della sua geometria, del suo amore per la scienza, la matematica, l’astronomia, del suo modo di vivere e dei suoi rapporti familiari” [312].

Il deserto ha quindi una dimensione simbolica, culturale e paesaggistica che dà origine al paradigma architettonico di abitazione per climi aridi.

Nell’area mesopotamica-egiziana in epoca neolitica, l’abbondanza di risorse disponibili e la possibilità del loro sfruttamento portò le comunità a risiedere stabilmente in un luogo circoscritto, condizioni alla base della nascita del villaggio.

In queste regioni, caratterizzate da ampie fasce di territorio desertico e stepposo, lo sviluppo dell’urbanesimo poté aver luogo nelle zone favorite da un sufficiente apporto di precipitazioni annue, oppure là dove vi fosse la possibilità di realizzare sistemi di irrigazione artificiale, mediante lo sfruttamento di corsi d’acqua o falde acquifere.

Il villaggio è manifestazione della civiltà, presenta caratteristiche diverse nel tempo e nello spazio, da regione a regione, mostrando la complessità e la varietà di soluzioni che accompagnano la creazione della “casa” in relazione alle diverse forme organizzative e alle diverse strutture sociali.

La forma delle differenti abitazioni e la loro relazione reciproca nello spazio riflette diverse tradizioni tipologiche dell’area mediorientale, ognuna legata a particolari caratteristiche sociali ed economiche che portano a diversi tipi di urbanizzazione: il villaggio a case isolate, in cui prevale la standardizzazione e i nuclei parzialmente autonomi delle singole unità familiari, e il villaggio agglutinato, nel quale le abitazioni si addossano le une alle altre al punto da non essere più distinguibili, trasmettendo l’idea di una società molto coesa.

Un esempio peculiare è quello degli insediamenti oasiani, frutto di un equilibrio sociale, architettonico, agricolo e ambientale, in cui l’isolamento geografico ha un ruolo preponderante tanto da risultare impossibile scindere i diversi aspetti.

In questo caso il villaggio, nel suo nucleo originario, assume la forma di una massa compatta, dove i pieni prevalgono sui vuoti, in un disegno della città caratterizzato da strade strette e tortuose e grandi corti interne, che hanno il ruolo di fornire zone d’ombra e preservare al più possibile l’aria fresca della notte, la quale ha un grande valore simbolico nella cultura araba.



Fig. 2.1: L'Oasi di Siwa, Egitto. Le istanze climatiche sono all'origine dell'insediamento dell'intero villaggio, dall'impianto urbano all'architettura delle abitazioni.¹³

Carattere distintivo di questi insediamenti è quello di non essere originati da un predeterminato ordine geometrico, ma di seguire un principio generatore basato sull'aggregazione gerarchica degli ambienti intorno alla corte: l'unità minima è la stanza, un modulo ripetibile dotato di un sua volumetria. La corte risulta quindi generata dall'aggregazione funzionale delle singole cellule che vi si affacciano e dal contesto urbano in cui la casa si inserisce.

I caratteri morfologici e la chiara necessità di schermarsi dal sole portano a prospetti su strada con piccole bucatore, in cui prevale l'aspetto volumetrico, ed aperture più grandi sulla corte, che

¹³ Immagine tratta da <https://it.pinterest.com/pin/378232068679820866/>

garantiscono l'illuminazione e la ventilazione, sottolineando il carattere culturale introverso.

L'utilizzo plastico della materia, come roccia, terra e fango, radica le costruzioni al terreno, con un'opera sottrattiva e al tempo stesso additiva, generando una costruzione altamente massiva, con grandi spessori che assolvono il sostegno strutturale e la protezione dal caldo.

Di particolare interesse è l'evoluzione di questi modelli abitativi in epoche successive. A tal proposito emblematico è il caso della città de Il Cairo, una creazione ex novo durante i primi secoli di dominazione islamica d'Egitto fondata nel X secolo d.C. su una fortificazione romana. I presupposti lasciano intendere come la città sia nata in un luogo ricco di commistioni e impulsi di civiltà diverse, ereditando ed interpretando svariati caratteri abitativi.

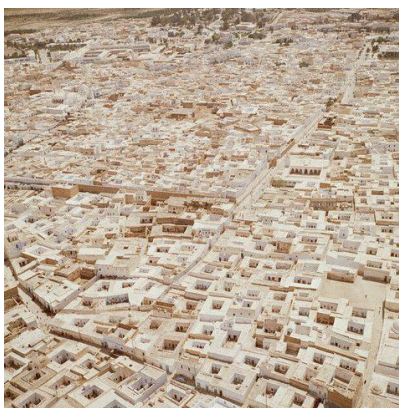


Fig. 2.2 A sinistra: Tessuto urbano denso e compatto: le strade sono compresse e ombrose, gli edifici affacciano sulle corti interne, Kairouan (Tunisia).¹⁴

Fig. 2.3 A destra: Strutture ipogee troglodite, (Tunisia).¹⁵

La casa tipo era costruita intorno a un cortile, con laboratori al pian terreno e diversi appartamenti ai piani superiori, caratteristica già riscontrata negli insediamenti oasiani, nei quali attività abitative e produttive venivano conciliate nel medesimo luogo.

La tipica forma della casa per grandi famiglie cittadine vede il suo sviluppo a partire dalla commistione tra la casa mediterranea tipica greco-romana con le tradizioni dell'Iran e dell'Iraq. Le case sono costruite per essere viste da dentro e non da fuori: da un vicolo si accede a un cortile centrale nascosto da cui si raggiungono le varie stanze.

Nelle aree più congestionate, la corte diventa una stanza centrale coperta chiamata qa'a (Figura 2.4), che assolve varie funzioni, nucleo di un sistema spaziale composto da elementi fissi, in un

¹⁴ Immagine tratta da <https://it.pinterest.com/pin/344314333985668066/>

¹⁵ Immagine tratta da <https://it.pinterest.com/pin/493707177886338936/>

rapporto dovuto tanto da motivi funzionali quanto alle necessità di climatizzazione naturale.

Nell'area sub-mediterranea si sono susseguiti una serie di accorgimenti urbanistici e costruttivi finalizzati al controllo climatico mediante la protezione dal sole, la ventilazione e l'utilizzo dell'acqua, per far fronte al clima caldo e secco. Si possono dunque individuare varie strategie:

- tessuto compatto (Figura 2.2.): mediante l'utilizzo di corti interne aperte, che rappresentano una estrusione delle troglodite strutture ipogee (Figura 2.3);
- controllo solare: attraverso l'uso di materiali ad elevata inerzia termica combinati a grandi spessori murari, realizzati con materiali locali di facile reperibilità, e all'utilizzo di bucaure ridotte;
- ventilazione estrattiva: mediante le corti ombreggiate e sistemi più complessi, come la qa'a, una corte coperta con altezza molto maggiore rispetto agli ambienti circostanti. Le pareti sono costituite da materiali massivi e protette dall'irraggiamento diretto (mediante la morfologia stessa dell'edificio), mentre la copertura è leggera e direttamente esposta, fattori che aumentano il tiraggio;
- ventilazione captativa: tipica della zona persiana dove presenta un grandissimo utilizzo, viene utilizzata anche nelle aree sub-mediterranee, generalmente combinata a sistemi di raffrescamento evaporativo. Un esempio sono i malqaf, aperture poste al di sopra del piano di copertura orientate verso la direzione del vento prevalente, in città dove spirano delle brezze ad altezze non elevate. Nella città de Il Cairo si trovano numerose strutture di questo tipo, al fine di captare le brezze marine provenienti da nord (da dove proviene anche una fonte di luce naturale diffusa), e rappresentano non solo un elemento tecnico ma sono inserite all'interno dello schema distributivo della qa'a;
- raffrescamento evaporativo: sistemi di ventilazione vengono spesso affiancati a sistemi di raffreddamento ed umidificazione del flusso d'aria mediante fenomeni evaporativi, provocati dall'aria che lambisce superfici umide o vasche d'acqua opportunamente posizionate.

“Nella casa araba, la fontana ha un ruolo equivalente a quello del focolare nelle zone temperate, benché l'una serva a raffreddare e l'altro a riscaldare. La fontana è pertanto un elemento architettonico privilegiato nell'impostazione planimetrica della casa.” [313]



Fig. 2.4 A sinistra: La qa'a della casa As-Suhaymi.¹⁶

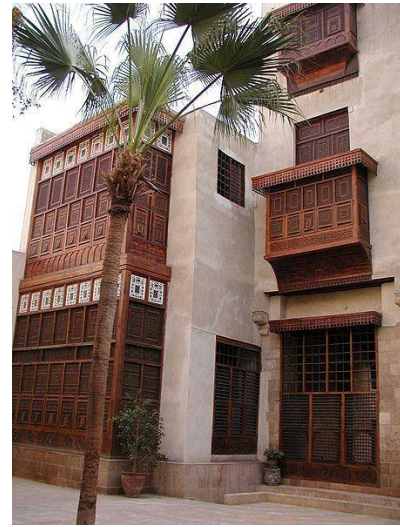


Fig. 2.5 A destra: un esempio di mashrabiya.¹⁷

Tra i più significativi elementi tradizionali diffusi nell'area mediorientale per il raffrescamento evaporativo si trova la *mashrabiya* (Figura 2.5), dal vocabolo arabo “bere”, il cui significato originario è “luogo dove si beve”. Esso è un elemento di facciata introdotto in area mediorientale durante la dominazione turca del XVI sec., come forma di adattamento seguente all'introduzione all'utilizzo di grandi aperture, tipiche della tradizione turca sviluppatesi in clima caldo umido. L'utilizzo di grandi aperture era poco conciliabile con la cultura introversa musulmana e con le caratteristiche ambientali, per questo si sviluppa la *mashrabiya*, un ambiente a sbalzo chiuso da pannelli di legno grigliati, nel quale venivano poste giare piene d'acqua in grado di raffrescare ed umidificare l'aria entrante attraverso un processo evaporativo. Il legno, materiale poroso e fortemente sensibile alle variazioni di umidità, contribuisce a questo processo, trattenendo umidità nella notte e rilasciandola durante il giorno, quando viene colpito dalla radiazione diretta.

Posta nella parte alta della stanza, la *mashrabiya* ha doppia valenza, di schermatura e raffrescamento, poiché permette inoltre l'estrazione dell'aria calda e l'illuminazione controllata, specie nei locali non disposti a nord dove la forte radiazione solare incidente risulta svantaggiosa.

Molti di questi caratteri sono riscontrabili nelle architetture andaluse e siciliane ereditate dalla

¹⁶ Immagine tratta da <https://it.pinterest.com/pin/296322850461263078/>

¹⁷ Immagine tratta da <https://it.pinterest.com/pin/477803841686977675/>

dominazione islamica avvenuta tra l'VIII e l'XI secolo: nel primo caso più efficienti, poiché il clima presenta bassi valori di umidità e quindi risulta più assimilabile a quello dei climi aridi, nel secondo, presentando valori di umidità più critici, gli interventi presentano delle varianti, come l'utilizzo dei giardini e delle fonti d'acqua per mitigare le condizioni esterne.

2.2.2 Il caso italiano: dagli archetipi agli edifici storici

Nel tardo neolitico l'area mediterranea settentrionale vede la nascita dei primi insediamenti abitativi, evento connesso con la strutturazione delle attività produttive come la pastorizia e l'agricoltura, in relazione alla necessità difensiva dei centri. Si sviluppano insediamenti su due livelli: da un lato villaggi di forte vocazione produttiva, dall'altro abitati maggiori, vere cittadelle fortificate a controllo di importanti vie di comunicazione, come gli itinerari legati alla transumanza delle greggi o dei migliori terreni agricoli. Data la complessità del tema, verrà di seguito posta attenzione al caso italiano, di grande interesse per la sua posizione geografica di centralità tra gli scambi nel mediterraneo, con particolare interesse all'area centro-meridionale e isolana.

Nell'area italiana, gli insediamenti protostorici testimoniano una crescita per gemmazione intorno a nuclei base, presentando tuttavia embrionali caratteristiche urbanistiche, come le case disposte in isolati attorno a templi e fonti sacre.

Il filo conduttore che lega le architetture rupestri e gli agglomerati protourbani è la ricerca della protezione dal caldo: nelle prime attraverso lo sfruttamento diretto della frescura del terreno estiva, nei secondi mediante la riproposizione dello stesso principio secondo un fenomeno additivo e non sottrattivo, mediante l'utilizzo di pareti terra o pietra di ingenti spessori.

Il più famoso esempio di architettura rupestre è rappresentato dai Sassi di Matera (Figura 2.6), un insediamento sviluppatosi in epoca preistorica ed evolutosi nel tempo, fino a diventare un vero e proprio complesso urbano semi-ipogeo; la tipologia insediativa rispetta un modello basato su una vita sociale di collaborazione e condivisione degli spazi, in un'apparente disordinato degradare e sovrapporsi di cellule abitative contigue. Le varie unità abitative sono disposte con variabilità di orientamento ed affaccio e si sviluppano nella profondità della roccia, al fine di proteggere l'interno dall'irraggiamento estivo e di sfruttare la temperatura interna pressoché costante.

Pur rappresentando una valida strategia del controllo delle temperature estive, gli insediamenti ipogei di questo tipo presentano delle criticità, come i livelli di illuminazione, areazione e umidità. *“I popoli del Mediterraneo hanno sempre scelto caverne e grotte, naturali o scavate,*

come abitazioni fresche e spesso difendibili, magazzini, stalle, cisterne, chiese, tombe e catacombe” [314].

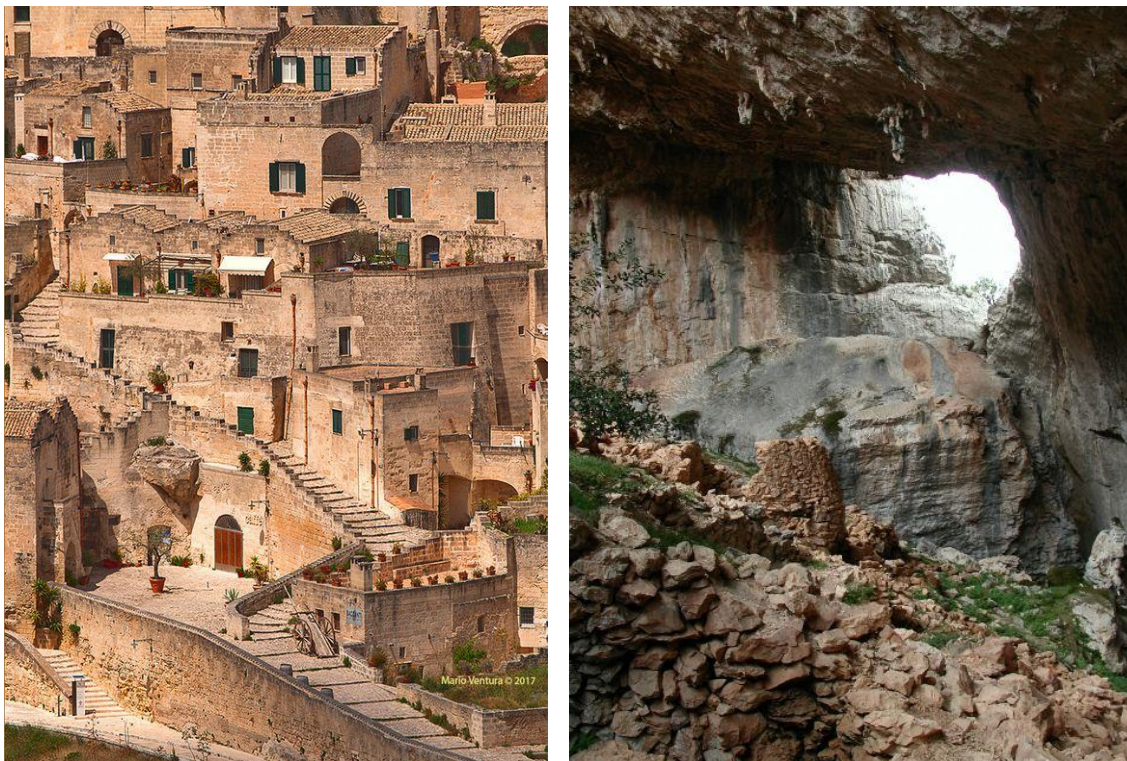


Fig. 2.6 A sinistra: gli insediamenti rupestri dei Sassi di Matera.¹⁸

Fig. 2.7 A destra: il villaggio nuragico all'interno della dolina carsica del monte Tiscali.¹⁹

Un caso singolare è rappresentato dal villaggio di Tiscali in Sardegna (Figura 2.7), un sito nuragico insediatosi all'interno di una dolina carsica che si trova sulla sommità dell'omonima piccola montagna: in questo caso, grazie alla depressione orografica, viene sfruttata l'inerzia termica del terreno parallelamente ai caratteri peculiari microclimatici, relativi all'ombreggiamento della dolina e all'abbassamento delle temperature al suo interno, i quali hanno nel tempo definito un habitat vegetativo singolare (altissimi arbusti secolari, cresciuti in altezza per raggiungere la luce esterna). L'insediamento è generato dalla definizione dei nuclei abitativi per gemmazione, attraverso l'utilizzo dei materiali reperibili in loco (pietre locali cementate con fango e argilla, architravi in legno di ginepro e non in pietra, come invece sono presenti negli altri insediamenti nuragici).

¹⁸ Immagine tratta da <https://it.pinterest.com/pin/764204630492399629/>

¹⁹ Immagine tratta da <https://it.pinterest.com/pin/475552041881353808/>

Di carattere invece additivo nei confronti del terreno, sono le evoluzioni delle capanne primitive mediante l'utilizzo di grandi spessori murari lungo tutto l'involucro.

Il caso dei trulli, tipologia diffusa nell'altipiano pugliese delle Murge, rappresenta un caso esemplificativo dell'adattamento al clima: la forma compatta e la copertura conica rappresentano un buon compromesso tra superficie, volume e difesa dalla radiazione e dai guadagni solari; la struttura è costituita da muratura a secco, con spessori fino a 2 metri che permettono di avere caratteristiche interne simili a quelle di un edificio ipogeo; le aperture sono ridotte alla porta d'ingresso e a un lanternino che permette la ventilazione notturna.

Di simile funzionamento è il dammuso, caratteristico dell'isola di Pantelleria, una tipologia originariamente stagionale di tipo agricolo, i cui caratteri morfologici sono declinati a una forma più allungata e all'uso della vegetazione per ridurre l'esposizione ai forti venti nord-orientali: anche in questo caso l'utilizzo della pietra a secco in elevati spessori e la ventilazione notturna permettono il controllo delle condizioni climatiche estive avverse.



*Fig. 2.8 A sinistra: trulli pugliesi, evoluzione dei caratteri primitivi tramite l'utilizzo di masse murarie in copertura.*²⁰

*Fig. 2.9 A destra: dammusi di Pantelleria, archetipi rurali*²¹

²⁰ Immagine tratta da <https://it.pinterest.com/pin/368450813241551400/>

²¹ Immagine tratta da <https://it.pinterest.com/pin/454441418626428097/>



Fig. 2.10 A sinistra: Pompei, Casa dei Vettii. Abitazione con caratteri ereditati dalla tipologia ad atrium etrusca e dal peristilio greco.²²



Fig. 2.11 A destra: tipologia aggregativa delle insulae pompeiane.²³

Un'altra tipologia abitativa tipica dell'area mediterranea settentrionale è la casa ad atrio, che riscuote grande successo in epoca romana.

Il primo tipo di abitazione etrusca è la capanna a pianta ovale o ellittica del periodo villanoviano (IX-VIII secolo a.C.), caratterizzata dall'uso di graticci lignei combinati a intonaci di argilla cruda, costituiti da materiali locali facilmente reperibili. Con l'evoluzione della società e dell'economia, le case diventano più solide, perdendo il carattere originario di precarietà, e a pianta quadrangolare, sintomo di una nuova tendenza alla regolarità che porta alla disposizione in isolati che affacciano su due strade principali ortogonali.

A differenza delle prime capanne, in cui si evidenzia il carattere primitivo di protezione e di isolamento dei singoli nuclei, l'assetto delle case diviene regolare, sia per quanto riguarda l'aggregazione sia dal punto di vista distributivo interno: l'articolazione dei vani è intorno a uno spazio centrale aperto, spesso una estroflessione del vestibolo o del portico di accesso. Le pareti vengono innalzate per un piano con mattoni in terra cruda, sui quali era costruito un tetto in intelaiatura lignea rivestito di coppi, il quale presentava falde spioventi verso il cortile interno per lasciar confluire l'acqua piovana. Inizia a definirsi l'assetto di quella che sarà la tipica casa romana.

Nell'area europea centro-settentrionale il fenomeno dell'urbanizzazione si identifica

²² Immagine tratta da <https://it.pinterest.com/pin/60165345001313367/>

²³ Immagine tratta da <http://pompei.sns.it>

essenzialmente con il momento della romanizzazione: l'immagine della città si realizza prima di tutto nell'emergere del luogo collettivo rispetto all'area residenziale, che tuttavia riproduce uno spazio naturale adeguato alle esigenze climatico-ambientali. I criteri distributivi del tipo abitativo, in cui si inserisce spesso un'attività artigianale, sono vincolati ad una forma geometrizzata, cellula prima di un isolato, che a sua volta diventa modulo dell'aggregato.

Il prototipo abitativo della casa mediterranea imperniata sull'*atrium*, di eredità greco-etrusca, diventa nel mondo romano uno schema planimetrico costante, che tuttavia attraversa fasi di complicazioni tipologiche e specializzazioni funzionali. Nelle domus di età repubblicana, il primitivo ambiente preceduto da una corte diventa il fulcro della vita sociale, il *tablinum*, e separa gli spazi degli uomini da quelli delle donne (raccolti intorno all'*atrium* i primi, affacciate su di un cortile interno, il *viridarium*, le seconde). L'articolazione funzionale di questo spazio include, nelle ville più ricche fornite di acqua e provviste di un sistema di smaltimento, spazi destinati a servizi igienici e, talvolta, impianti termali veri e propri.

Altri presidi di controllo ambientale utilizzati nell'antichità sfruttano la frescura proveniente dal terreno attraverso ambienti interrati o seminterrati, dove la presenza d'acqua ha un ruolo determinante.

Tra questi si ricorda il *cryptoporticus*, una sottostruttura presente in molte ville romane a partire dall'età repubblicana identificato come un corridoio di servizio ipogeo, con finestre a bocca di lupo, che collegava vari ambienti di residenze molto estese. La ricchezza delle decorazioni rinvenute in questi luoghi e la loro descrizione in alcune testimonianze letterarie, come l'*Epistolario* di Plinio il Giovane [1], fa dedurre che al di là delle necessità strutturali tali ambienti erano graditi ai proprietari delle ville ed utilizzati come luogo di passeggio e riposo, al riparo dalla calura estiva.

Coevo di Plinio il Giovane (I sec d.C.) è il Erone di Alessandria, matematico, ingegnere ed inventore greco che nei suoi scritti [315] descrive un evoluto sistema di raffrescamento ottenuto mediante moti d'aria provenienti da locali interrati e ricchi d'acqua, per mezzo di bocchette. Sistemi simili di raffrescamento vengo riproposti in tempi successivi, quando nel rinascimento avviene un forte riavvicinamento all'epoca classica.

Questo grazie alla riscoperta del testo di Vitruvio *De Architectura*, trattato teorico fondamentale dell'architettura occidentale fino al XIX secolo, sulla base del quale poste nuove basi teoriche nello studio del costruire in relazione al luogo.

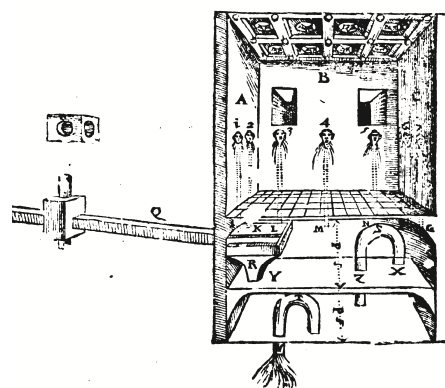


Fig. 2.12 A sinistra: Pompei, Casa del Criptoportico, le cui pareti decorate con episodi dell'iliade e il soffitto con volta a botte con stucchi.²⁴

Fig. 2.13 A destra: Illustrazione di Erone d'Alessandria sul raffrescamento mediante ventilazione proveniente dalle cantine.²⁵

“Saranno gli edifici privati ben disposti, se dal bel principio si rifletterà, agli aspetti e ai climi, nei quali si fabbrica; cosicché è fuori di dubbio che siano diverse le fabbriche che si fanno nell’Egitto da quelle nella Spagna, diverse da quelle del Ponto quelle di Roma, e così anche negli altri Paesi: giacché una parte della terra è sottoposta al corso del sole, un’altra ne resta lontana; e l’altra, che è nel mezzo, è temperata. [...] Sotto il settentrione si hanno a fare le abitazioni a volta, il più che si può riparate, non aperte, anzi rivolte agli aspetti caldi: nei luoghi meridionali, sottoposti alla veemenza del sole, poiché vi si muore dal caldo si debbono fare aperte e rivolte a tramontana, o a greco: così coll’arte si ripara dal danno, che farebbe da sé la natura; si prenderà degli altri Paesi nella stessa maniera un temperamento corrispondente al loro clima”. Vitruvio, De Architectura – Libro VI.

Sarà proprio Vitruvio a teorizzare quindi gli aspetti innati di adattamento dell’uomo al clima, il quale svolge un vero e proprio ruolo di temperamento dei corpi e delle menti, aspetti che verranno enfatizzati nel primo “revival” del classicismo avvenuto in Italia, successivamente al medioevo.

Di particolare interesse del testo i capitoli III e IV del libro VI, nei quali viene fatta un’ampia trattazione dei cortili, dei quali vengono sottolineati gli aspetti compositivi, relativi a

²⁴ Immagine tratta da <https://it.pinterest.com/pin/473652085801840128/>

²⁵ Immagine tratta da *Gli artificiosi, e curiosi moti spirituali di Herone. Tradotti da m. Gio. Battista Aleotti d'Argenta* [315]

proporzione e simmetria, parallelamente a quelli strutturali, di recupero delle acque, con particolare interesse alle soluzioni storiche egizie, greche e romane.

Sempre nel VI libro, trattando dell'edilizia privata, Vitruvio si sofferma diffusamente sulla questione dell'esposizione in relazione ai climi e alle latitudini. L'orientamento dei singoli ambienti è determinato dall'uso e dalla funzione da essi svolta, il quale, se ben calcolato, assicura inoltre una minore dispersione termica: i triclini invernali e i bagni devono essere rivolti all'occidente invernale *“per il fatto che è necessario vi si utilizzi la luce della sera”*, mentre le camere da letto e le biblioteche devono guardare a est, *“perché l'utilizzo mattutino richiede illuminazione, inoltre i libri non marciscono nelle biblioteche”*, così i triclini primaverili e autunnali, *“poiché essendo esposti alla luce innanzi ai raggi del sole nascente, questo avanzando verso ovest li rende temperati per quell'asso di tempo in cui è opportuno di regola utilizzarli”*, i triclini estivi devono invece rivolgersi a nord come le pinacoteche, le officine dei tessitori di ricami e le botteghe dei pittori *“in quanto tale orientamento non è come gli altri che durante il periodo del solstizio per il calore diventano torridi, in quanto esso è opposto al corso del sole, sempre refrigerato e garantisce durante l'utilizzo salubrità e piacere”*.

L'opera di Vitruvio verrà portata avanti da vari autori rinascimentali, che dopo il momento buio del medioevo riscopriranno le grandezze e gli insegnamenti dell'antichità.

Nel *De re Aedificatoria*, scritto dall'Alberti intorno al 1450 nel suo periodo di permanenza a Roma con l'intento di fare una rilettura critica del trattato vitruviano, risulta evidente la sensibilità alle tematiche di relazione al luogo e al clima, come si legge nel passo del libro V *“volgi tutte le stanze per la state che ricevino i venti grechi; quelle per l'inverno voltale a mezzogiorno; quelle per la primavera e per lo autunno voltale a levante. [...] Perciocchè a lo inverno si provvede facilmente, ed è a bastanza il serrare ed accendere il fuoco. Contro il caldo bisognano molte cose, ma elle non giovano sempre a bastanza, e perciò fa che le stanze per l'inverno sieno piccole, basse e con piccole finestre, e le stanze per la state sieno larghe, aperte, spaziose, e fa che ricevino i venticelli freddi, ma non v'entrino nè i soli nè le vampe loro. Gran quantità d'aria rinchiusa in una stanza grande, a similitudine di una gran quantità d'acqua, pena assai a riscaldarsi.”*

Il discorso verrà portato avanti ed approfondito da Palladio, molto sensibile sui temi di controllo climatico, riporta nel primo dei suoi Quattro libri sull'architettura un riferimento al sistema dei *Covoli di Costozza*, dei “ventidotti”, ovvero cavità nel terreno utilizzate per il raffrescamento di un complesso di ville soprastanti, costruita a partire dal 1550 .

“Quasi nell'istesso modo i Trenti Gentil'huomini Vicentini à Costozza lor Villa rinfrescano

l'Estate le stanze: Percioche essendo ne i monti di detta Villa, alcune cave grandissime, che gli habitatori di quei luoghi chiamano covali, e erano anticamente Petraie, delle quali credo che intenda Vitruvio, quando nel secondo libro, ove tratta delle pietre, dice, che nella Marca Trivigiana si cava una sorte di pietra, che si taglia con la sega, come il legno, nelle quali nascono alcuni venti freschissimi; questi Gentil'huomini per certi volti sotterranei, ch'essi dimandano Ventidotti; gli conducono alle loro case, e con canne simili alle sopradette conducono poi quel vento fresco per tutte le stanze, otturandole, e aprendole à lor piacere per pigliare più, e manco fresco, secondo le stagioni. E benche per questa grandissima commodità sia questo luogo maraviglioso, nondimeno molto più degno di esser goduto e visto lo rende il carcere de' Venti, che è una stanza sotterra fatta dell'Eccellentissimo Signor Francesco Trento, e da lui chiamata EOLIA: ove molti di detti Ventidutti sboccano: nella quale per fare che sia ornata, e bella, e conforme al nome, egli non ha sparagnato né à diligenza, né à spesa alcuna". Un altro esempio sempre del XVI sec. è rappresentato dalle *Camere dello Scirocco* di a Palermo. Anche in questo caso sembra forte la suggestione dei criptoportici e ninfei di età romana, a testimonianza della loro riscoperta in età rinascimentale.

Le *Camere dello Scirocco*, utilizzate dagli aristocratici come rifugio dal caldo estivo, sono strutture ipogee costruite vicino a sorgenti d'acqua e sono tipologicamente composte da stanze quadrangolari o rotonde con una scala di accesso, voltate in pietra, con sedute lungo i lati e decorate da dipinti, maioliche, statue o piante. L'acqua canalizzata in tunnel sotterranei e fontane contribuisce a rendere il luogo fresco [138].

Sistemi simili di controllo climatico sono stati riscontrati in molte altre residenze e palazzi rinascimentali ed Ottocenteschi [316], sfruttando l'elevata inerzia delle murature e sorgenti di aria fredda provenienti da cortili e locali ipogei simili a quelli precedentemente descritti. Diventa evidente che sistemi così particolari non possano più rientrare all'interno di semplici accorgimenti che sono patrimonio dell'architettura tradizionale ma vere e proprie tecnologie.



Fig. 2.14 A sinistra: "Carcere dei Venti", criptoportico sottostante a Villa Eolia nel quale terminano i ventidotti provenienti dalle vicine grotte.²⁶

Fig. 2.15 A destra: Camera dello Scirocco in una immagine del tardo XIX sec.²⁷

²⁶ Immagine tratta da <http://corrieredelveneto.corriere.it>

²⁷ Immagine tratta da *Analytical studies of the Sirocco room of Villa Naselli-Ambleri: A XVI century passive cooling structure in Palermo (Sicily)* [138]

2.3 Strategie di raffrescamento passivo

Le strategie di raffrescamento passivo possono dividersi in due macro-categorie [317] [318] [319]:

1. una finalizzata al controllo termico, respingendo il calore proveniente dall'esterno prima che raggiunga lo spazio interno e riducendo il calore prodotto all'interno,
2. l'altra finalizzata alla dissipazione del calore in eccesso attraverso "pozzi termici" naturali, cioè fonti fredde.

Le strategie del tipo 1 possono essere attuate attraverso differenti sistemi:

- protezione delle superfici trasparenti dall'irraggiamento diretto durante il periodo estivo;
- potenziamento dell'involucro ed alla sua capacità di smorzare le oscillazioni termiche esterne estive;
- riguardanti la gestione dei carichi interni, ovvero gli apporti prodotti da persone ed apparecchiature, nelle stagioni calde.

I sistemi di raffrescamento naturale, strategie di tipo 2, possono essere suddivise in base al "pozzo termico" utilizzato:

- aria in movimento:
 - *comfort ventilation*, ovvero l'aumento della velocità dell'aria che riduce la temperatura percepita;
 - *free cooling*, ovvero l'introduzione di aria fredda;
 - *structural cooling*, ossia l'utilizzo del raffreddamento delle masse termiche interne, quando le temperature esterne sono inferiori a quelle interne;
- terreno:
 - raffrescamento geotermico diretto, mediante locali ipogei;
 - raffrescamento geotermico indiretto, attraverso condotti che sfruttano l'inerzia termica del terreno combinata a ventilazione naturale o meccanica;
- l'acqua:
 - raffrescamento evaporativo diretto, attraverso il calore sensibile dell'aria ceduto sotto forma di calore latente di evaporazione dell'acqua, mediante nebulizzazione o contatto con fonti d'acqua;
 - raffrescamento evaporativo indiretto, attraverso il calore sensibile dell'aria ceduto sotto forma di calore latente di evaporazione dell'acqua, mediante sistemi ibridi che utilizzano la ventilazione meccanica;

- il cielo notturno:
 - raffrescamento radiativo diretto, attraverso lo scambio termico per irraggiamento tra il cielo notturno e il tetto;
 - raffrescamento radiativo indiretto, attraverso lo scambio termico per irraggiamento tra il cielo notturno e collettori sul tetto.

2.3.1 Generalità sulla ventilazione naturale

Parlando di ventilazione ai fini di determinare i moti d'aria all'interno di un edificio si deve affrontare un discorso su differenti scale: da una parte quella urbana o territoriale, che determina l'esposizione ai venti di uno o un complesso di edifici, dall'altra quella del singolo edificio, della sua esposizione alle correnti d'aria e la disposizione delle aperture.

Per quanto riguarda l'aspetto territoriale, l'area mediterranea è caratterizzata dalla presenza di fenomeni di carattere variabile, influenzati dalle stagioni e dalla morfologia del territorio, che soffiano in modo irregolare e sono particolarmente legati a condizioni locali. Questo ha determinato la definizione della rosa dei venti, le cui figurazioni risalgono ai tempi dei greci e dei romani, con la quale si indicò la disposizione figurativa entro un cerchio del sistema dei venti, attraverso la quale è possibile definire direzione e velocità dei venti e la loro distribuzione nel tempo [320].

Inoltre sono presenti fenomeni di carattere periodico, influenzati prevalentemente da aspetti morfologici ed orografici piuttosto che meteorologici: nei siti collinari sono presenti fenomeni di brezze ascendenti giornaliere e discendenti serali, i quelli costieri brezze verso la terra di giorno e verso il mare la sera, determinate dall'elevata capacità termica dell'acqua che genera moti legati alla differenza di temperatura tra questa e il terreno nell'arco delle ventiquattrore. Inoltre la presenza di vaste zone verdi, che genera fenomeni di abbassamento della temperatura locale legati all'ombreggiamento del terreno e all'evapotraspirazione, può causare moti verticali e di rimescolamento che determinano delle celle convettive [321].

Considerando i sistemi di ventilazione naturale, questi fenomeni, se presenti, rappresentano la prima risorsa da sfruttare, poiché meno dipendenti dalle condizioni meteorologiche dei moti atmosferici, i quali presentano una variazione statistica più elevata.

Occorre notare che in ambito urbano la situazione che si presenta è differente da quella riscontrabile in situazioni climatiche ed orografiche isolate, poiché la densità del costruito genera due fenomeni paralleli: da un lato, data la sua complessità geometrica, provoca situazioni di turbolenza instabile con variazione delle velocità del vento locali, d'altro canto genera il cosiddetto fenomeno "dell'isola di calore", nel quale le alte temperature, dovute

dall'inquinamento e dalla presenza di ridotte superfici libere di terreno, vengono aggravate dall'innescarsi di fenomeni convettivi tra ambiente urbano e campagna circostante, che vanno ad alimentare l'innalzamento delle temperature nella stagione estiva [322] [323].

Da quanto descritto emerge che gli strati prossimi al suolo urbano presentano caratteristiche e configurazioni estremamente complesse, poiché variano in base alle caratteristiche morfologiche, geometriche, posizione geografica, caratteristiche climatiche locali, relazioni con il contesto esaminato. Gli strumenti più utilizzati per lo studio di tali fenomeni sono delle prove sperimentali condotte su modelli in scala nella galleria del vento oppure le simulazioni fluidodinamiche mediante sistemi computazionali, all'interno dei quali è possibile tener conto di molteplici variabili.

Come avviene nei contesti urbani, i fenomeni che regolano la ventilazione naturale alla scala dell'edificio sono complessi e presentano molteplici variabili, quindi per ottenere risultati precisi e valutare scenari articolati è necessaria un'analisi approfondita dei singoli casi ed a riguardo è disponibile un'ampia bibliografia [324] [325] [326] [148] [149] [151].

Tuttavia, su una casistica empirica, è possibile evidenziare alcuni fenomeni noti al fine di cogliere gli aspetti macroscopici legati alla morfologia degli edifici, all'orientamento rispetto ai venti dominanti e alla disposizione delle aperture.

Risulta necessario sottolineare la presenza di due cause che generano moti di ventilazione a livello architettonico: le differenze di pressione indotte da cause aerodinamiche, ovvero dalle forze esterne dei venti, e quelle indotte da cause termodinamiche, relative all'effetto della spinta idrostatica che tende a far salire le masse d'aria più calde con densità minori (moti convettivi).

Lo scenario più semplice è riferibile alla ventilazione a lato singolo, *single side ventilation*, nel quale il vento entra ed esce dall'ambiente mediante una sola apertura sopravento: in termini dinamici, essendo il vento una forza non costante nel tempo ma ad impulso, entra dall'apertura generando uno stato di sovrappressione che, al calare del regime di vento, genera una corrente uscente che tende ad equilibrare la sovrappressione interna con la pressione esterna. Questo movimento viene definito "a pistone", o anche *push-pull ventilation*.

Nel caso siano presenti due aperture, lungo i fronti sopravento e sottovento, si parla di ventilazione incrociata, *cross ventilation*, nella quale risulta avere molta importanza la disposizione delle aperture: se allineate, la corrente d'aria fluisce rapidamente causando solo un lieve ricircolo turbolento all'interno dell'ambiente; se le aperture non sono allineate la velocità del flusso sarà minore, a causa di una perdita di energia cinetica dovuta all'aumento della turbolenza e delle forze di attrito, ma l'effetto della ventilazione all'interno sarà maggiore.

Nel caso in cui le aperture non siano disposte lungo la direzione perpendicolare a quella del

vento, è possibile utilizzare dei deflettori (elementi architettonici come aggetti orizzontali e verticali) che devino il flusso realizzando una differenza di pressione tra le aperture: in tal caso si tratta di *bypass ventilation*.

Un altro fenomeno che si presenta all'interno degli ambienti confinati è quello dell'effetto camino, detto *stack ventilation*, legato a cause termodinamiche, in cui i moti di tipo convettivo sono generati da differenze di temperatura a cui seguono differenze di densità dell'aria: si tratta quindi di un moto legato alla spinta idrostatica e alle forze di galleggiamento. Il fenomeno può esistere anche in assenza di venti esterni, in questo caso il tasso di ricambio d'aria è funzione della sola dimensione delle aperture, della differenza di quota tra di esse e della differenza di temperatura interna ed esterna.

A differenza dei fenomeni precedentemente descritti, nella ventilazione prodotta dall'effetto camino risulta importante evitare i conflitti e favorire le sinergie tra flussi d'aria generati dai gradienti di temperatura e quelli generati dalle differenze di pressione dei venti esterni all'edificio.

2.3.2 Ventilazione e raffrescamento delle masse

Quando si parla di valutazione energetica e comfort interno negli edifici del patrimonio bisogna innanzitutto considerare alcuni aspetti:

- l'elevata inerzia termica delle strutture, aspetto dovuto a questioni culturali, costruttive ma soprattutto di controllo climatico grazie allo sfasamento e smorzamento delle oscillazioni di temperatura esterne;
- la destinazione d'uso, soprattutto nell'ottica del cambio di destinazione e dell'aumento degli standard prestazionali (molti edifici storici sono stati destinati ad uffici pubblici, scuole o musei);
- l'assenza di impianti di condizionamento HVAC al loro interno, almeno originariamente, e l'eventuale loro integrazione.

Il testo che segue viene focalizzato sulla ventilazione naturale combinata alla presenza di masse ad elevata capacità termica, una strategia di raffrescamento che, per i motivi sopra esposti, è generalmente applicabile agli edifici storici.

Per questo verranno approfonditi alcuni aspetti metodologici della ventilazione naturale diurna (*comfort ventilation*) e della strategia di raffrescamento passivo data dalla combinazione della ventilazione naturale notturna al raffrescamento delle "masse termiche" dell'edificio (*structural cooling*), ovvero quelle componenti (pareti, solai, partizioni interne, etc.) che presentano una elevata capacità termica, spesso combinata a spessori considerevoli. Quest'ultima strategia è

basata sull'accumulo durante il giorno del calore nelle masse termiche a contatto con l'ambiente interno, al fine di dissipare questa energia durante la notte attraverso il raffreddamento delle medesime, che avviene con l'immissione di aria fredda dall'esterno mediante l'apertura delle finestre.

Nel capitolo 33 dell'ASHRAE Handbook del 1999 [327] vengono riportate alcune interessanti considerazioni sugli effetti di accumulo termico di elementi massivi all'interno degli edifici, la cui efficacia viene determinata dai seguenti fattori:

- le caratteristiche fisiche degli elementi massivi;
- la natura dinamica dei carichi termici dell'edificio;
- l'interazione tra la massa e l'aria interna dell'edificio;
- le strategie di carico e scarico dell'energia termica (ventilazione notturna).

Nel manuale viene evidenziato il fatto che l'utilizzo di elementi massivi all'interno dell'edificio ha un effetto significativo tanto sulle temperature interne quanto sull'impianto di condizionamento e ventilazione meccanica (HVAC system), poiché l'accumulo termico riduce e ritarda i picchi dei carichi di riscaldamento e raffreddamento, riducendo i consumi energetici.

Sempre in quel contesto, viene fatto un chiaro riferimento all'utilizzo di sistemi di ventilazione notturna (definiti sistemi di "preraffreddamento" degli elementi) i quali possono ridurre la richiesta energetica di raffrescamento.

Ciò premesso, alcuni concetti vanno precisati.

Per accumulo termico si intende l'energia che potenzialmente può essere immagazzinata in un elemento ed esso dipende dalla sua massa, dal suo calore specifico, e dalle differenze della sua temperatura rispetto all'ambiente nel tempo.

Al contrario, la quantità di energia che può essere effettivamente ceduta da un elemento all'ambiente è direttamente proporzionale alla superficie dell'elemento esposta allo scambio, alla differenza di temperatura tra l'elemento e l'ambiente e al coefficiente di scambio termico; pertanto è fortemente influenzata dal moto dell'aria a contatto con la superficie e dalla finitura superficiale dell'elemento medesimo, cioè da aspetti convettivi e radiativi del fenomeno di scambio solido-fluido.

Questi concetti vengono espressi dalla relazione:

$$\dot{Q}_s = \rho c_p V \left(\frac{dT_s}{dt} \right) = h_0 A (T_s - T) \quad [KW] \quad (2.1)$$

dove:

\dot{Q}_s = flusso termico scambiato tra elemento e ambiente [kW];

ρ = densità di massa;

c_p = calore specifico a volume costante;

V = volume dell'elemento;

t = tempo;

h_0 = coefficiente di trasferimento, somma di quello radiativo e convettivo ($h_c + h_r$);

A = area della superficie di scambio;

T_s = temperatura dell'elemento;

T = temperatura dell'ambiente.

Un ulteriore approfondimento va fatto in relazione al secondo membro della Equazione 2.1, in particolare al coefficiente h_0 e alla temperatura dell'ambiente T . La formula che esprime lo scambio termico tra una parete solida e l'aria è figlia di una modellazione sommaria e di prove sperimentali che hanno consolidato nella letteratura i valori di h_0 . Questo coefficiente tiene soprattutto in considerazione le caratteristiche del moto dell'aria intorno alla parete solida e quindi riassume tutta la complessità del trasferimento di massa e di energia esistente nell'aria medesima e tra l'aria e il solido.

Inoltre, la variabile T , spesso definita in letteratura con il termine T_∞ , parla di una distanza tra una superficie solida e il punto dell'aria in cui questo valore viene monitorato. In realtà, T_∞ viene ritenuta la temperatura media dell'ambiente e quindi dietro questa formula c'è l'idea che l'ambiente sia a temperatura uniforme.

Implicitamente, nella formula suddetta, si esprime l'idea che l'efficacia dell'accumulo e del rilascio dell'energia in e da una massa termica dipendono strettamente dalle caratteristiche del moto dell'aria intorno ad esso.

Ciò premesso, in base al loro posizionamento, le masse termiche possono essere suddivise in due categorie:

- masse termiche esterne, ovvero esposte direttamente alle variazioni di temperatura dell'ambiente esterno (chiusure orizzontali e verticali);
- masse termiche interne, che non sono esposte direttamente alla temperatura esterna (come le partizioni interne o gli arredi).

Rappresenta un caso di studio interessante la condizione in cui la massa termica si trovi nelle chiusure orizzontali e verticali in combinazione a strati di coibentazione. Questa è una condizione che può essere presente quando l'edificio storico sia stato soggetto ad un intervento di recupero.

In tal caso entrano in gioco ulteriori fattori:

- la posizione dell'isolante [150] [166];
- le condizioni al contorno della massa termica, ovvero l'esposizione alla variazione delle temperature esterne o interne.

A tal proposito, recenti studi effettuati in Italia evidenziano il sempre più crescente interesse verso l'approfondimento di questi temi [328] [329] [320].

3. Cenni sulle teorie del comfort termico

3.1 Cos'è il comfort?

In una visione antropocentrica dell'architettura, in cui questa rappresenta arte e scienza dell'uomo e per l'uomo, risulta necessaria una nota circa l'obiettivo che si vuole raggiungere, ovvero il benessere, in cui il rapporto uomo-ambiente è determinante ai fini della giusta fruizione di uno spazio. Il comfort umano non può essere ridotto a una mera questione prestazionale o numerica, poiché coinvolge determinanti aspetti fisiologici e psicologici dei singoli individui, parametri non costanti ma diversi da luogo in luogo secondo fattori genetici, culturali ed economici. Risulta evidente che il benessere non è una quantità che si può misurare analiticamente, coinvolgendo numerose variabili di cui molte soggettive e psicologiche.

Parlando di comfort ambientale, entrano in gioco numerosi fattori, raggruppabili in alcune macro-categorie come il comfort termico e igrometrico, il benessere olfattivo, legato alla qualità dell'aria, quello visivo, legato all'illuminazione, quello acustico e psichico.

La conoscenza dei fenomeni fisici, biologici e psicologici relativi alle sensazioni di benessere può aiutarci nella valutazione qualitativa e quantitativa del comfort.

Per quanto riguarda la valutazione quantitativa, le normative forniscono dei parametri da misurare e da rispettare all'interno di una cultura oggettiva e prestazionale. Ad esempio, in tema di comfort luminoso la normativa fornisce dei parametri vincolanti sulla distribuzione della quantità di luce in termini di intensità, temperatura di colore, resa cromatica e abbagliamento. Tuttavia risulta difficile misurare la percezione umana delle geometrie e dello spazio, le reazioni biologiche e psicologiche allo spettro luminoso ed al tempo di esposizione, ai colori, alla visuale esterna, e per questo gli aspetti normativi vanno compresi e interpretati caso per caso con la sensibilità del progettista ed arricchiti con valutazioni soggettive e contestualizzazioni culturali.

Al fine di poter effettuare una valutazione critica di queste tematiche, a tutt'oggi aperte ed oggetto di dibattiti e continui aggiornamenti, può essere utile fornire un quadro storico dell'evoluzione delle teorie e delle normative sul comfort termico nello scorso secolo e un'analisi dei parametri che definiscono tale condizione di benessere.

Il benessere termico è *“la condizione mentale di soddisfazione termica nei confronti del microclima, definito come il complesso dei parametri climatici degli ambienti confinati in grado di influenzare gli scambi termici soggetto-ambiente”* [330].

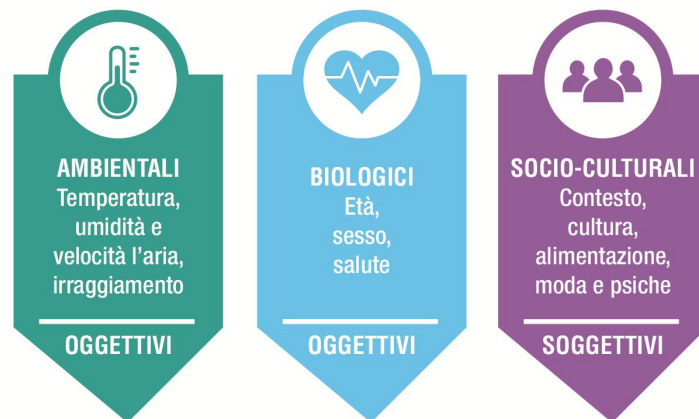


Fig. 3.1: Fattori oggettivi e soggettivi che determinano il comfort termico.

Il comfort è legato principalmente a tre aspetti: quello fisiologico, ovvero alla quantità di impulsi nervosi che raggiungono l'ipotalamo, quello psicologico, relativo a condizioni soggettive e di soddisfazione individuale difficilmente valutabili da un punto di vista analitico, quello del bilancio termico, raggiunto dall'equilibrio tra energia ceduta e ricevuta dal corpo (omeotermia).

La percezione termica è dovuta ad alcuni fattori oggettivi misurabili (temperatura dell'aria, umidità relativa, velocità dell'aria, radiazione solare, condizioni biologiche-fisiologiche legate ad età, sesso, stato di salute, etc.) ed al contempo a fattori personali difficilmente quantificabili (condizioni psicologiche e socio-culturali, come alimentazione, educazione, classe sociale, etc.).

In caso di squilibrio termico tra corpo ed ambiente entrano in gioco due fattori importanti: la termoregolazione, il meccanismo fisiologico che garantisce l'equilibrio, e il tempo di acclimatazione, poiché esso risulta essere breve dal caldo al freddo (attraverso un aumento del tasso calorico metabolico) ma molto lungo dal freddo al caldo.

La termoregolazione avviene attraverso dei ricettori termici che, reagendo alla temperatura esterna e alla velocità di variazione di questa, inviano impulsi nervosi all'ipotalamo, dal quale partono segnali relativi alla vasocostrizione o dilatazione dei capillari, ai brividi dei muscoli, o alla sudorazione prodotta dalle ghiandole. Lo studio deve quindi essere condotto su due piani, ovvero sia dal punto di vista dell'uomo, tenendo in considerazione aspetti etnico-culturali legati al modo di vivere, l'attività svolta dall'individuo, l'abbigliamento, etc., sia dal punto di vista delle trasformazioni termodinamiche che avvengono nell'ambiente, che vanno ad alterare i parametri di temperatura, umidità e velocità dell'aria, che definiscono la condizione di comfort.

La ventilazione è un parametro importante poiché influenza gli scambi termici tra il corpo e

l'ambiente per convezione e il calore ceduto per evaporazione nel processo di sudorazione e traspirazione. Inoltre elevati valori della velocità dell'aria aumentano la sensazione di benessere e riducono conseguentemente l'effetto negativo dell'elevata umidità, fondamentale nei climi caldo umidi, estendendo la zona di comfort verso valori di temperatura dell'aria maggiori. Inoltre la ventilazione naturale influenza la qualità dell'aria, con effetti positivi sulla salute delle persone.

3.2 Basi ed evoluzione delle teorie del comfort

I primi passi in ambito di comfort termico vengono condotti negli anni '20 negli Stati Uniti, dove inizia lo studio per la definizione di un parametro oggettivo, dipendente da temperatura, umidità e velocità dell'aria, che sintetizzi l'accettabilità delle condizioni interne (*effective temperature*, definita da valori costanti sul diagramma ASHRAE, ovvero zone delimitate su di un grafico riportante temperatura e umidità relativa dell'aria).

Negli anni '50 inizia a diffondersi un filone critico verso questo tipo di approccio, strettamente legato all'uso degli impianti e a questioni lontane dall'effettiva percezione umana: vengono sviluppati dai fratelli Victor e Aladar Olgyay degli studi che prendono in esame gli effetti generati dalle condizioni esterne su quelle interne, finalizzati alla diffusione di un approccio bioclimatico e regionalista all'architettura, più indirizzato quindi verso aspetti soggettivi.

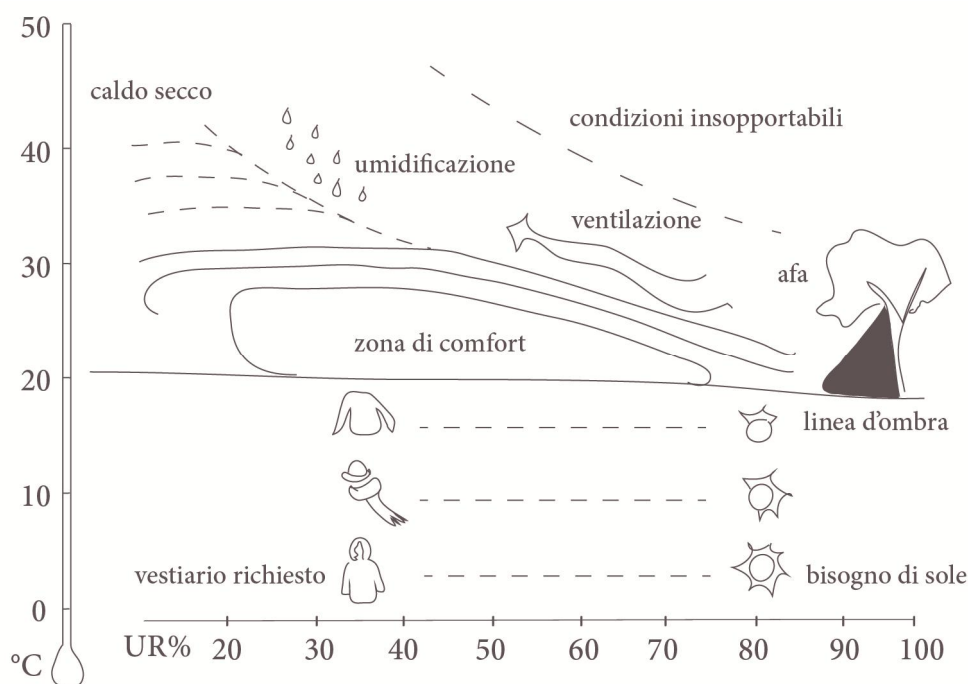


Fig.3.2: Diagramma di Olgyay, uno strumento per valutare le necessità dell'uomo in funzione del clima.

Negli anni '70 si pongono all'interno di questo filone gli studi di Baruch Givoni, il quale, basandosi su prove sperimentali, propone la definizione di nuove aree di comfort nel diagramma ASHRAE in base alla strategia passiva utilizzata: inizia quindi a cambiare tendenza da un approccio numerico-prestazionale ad uno qualitativo-adattivo, ai fini non della valutazione degli impianti ma dell'utilizzo delle strategie passive.

3.2 Modello di Fanger

Sempre negli anni '70, con la tesi di dottorato del danese Povl Ole Fanger, vengono condotti i primi studi al fine di definire un modello termo-fisico del corpo umano, in base ad esperienze condotte su di un campione di popolazione nord americana in camera climatica, in condizioni stazionarie: è il primo tentativo di valutazione delle variabili soggettive attraverso un metodo statistico.

Il modello si basa su un'equazione del bilancio termico attraverso otto variabili: quattro microclimatiche (temperatura, velocità dell'aria, umidità relativa, temperatura media radiante), due fisiologiche (temperatura della pelle e potenza termica emessa per sudorazione), e due individuali (attività metabolica, funzione dell'attività compiuta, e resistenza termica dell'abbigliamento, relativa al vestiario).

Gli indici del modello sono il PMV (*predicted mean vote*), ovvero il voto medio previsto circa il gradimento di un ambiente termico da parte della persona, e il PPD (*predicted percentage dissatisfied*), cioè la percentuale prevista di insoddisfatti in particolari condizioni climatiche-fisiologiche.

Questi indici mettono in relazione i dati statistici del voto medio (tra -3 e +3) e della percentuale di insoddisfatti: nel caso di voto medio 0 (neutralità) è comunque presente una percentuale di insoddisfatti pari al 5%.

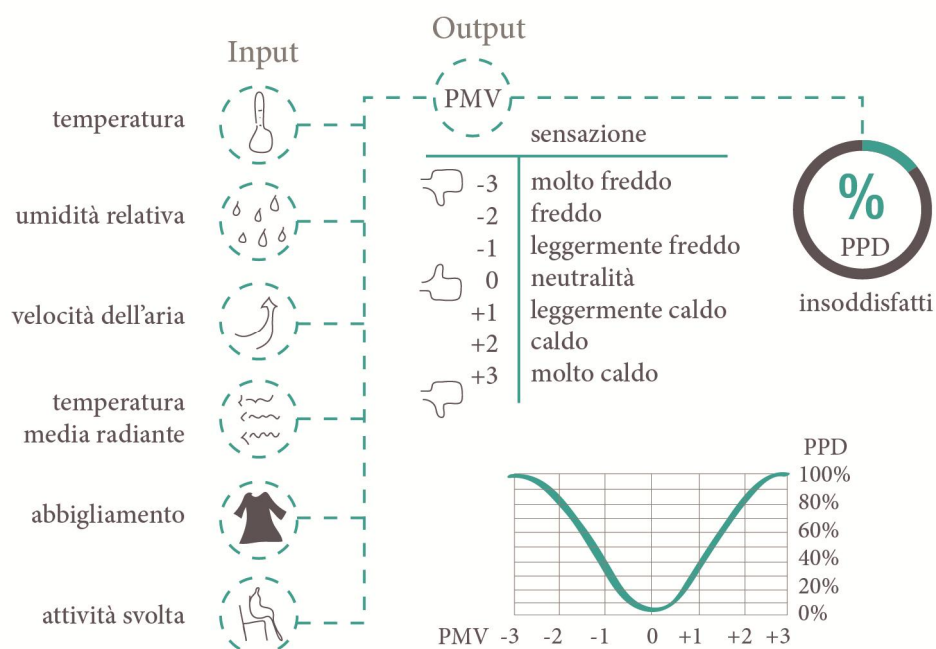


Fig. 3.3: Modello di Fanger: determinazione del voto medio previsto e della percentuale degli insoddisfatti (che non arriva mai a zero, in condizioni di neutralità è pari al 5%).

Interessante notare l'attenzione che viene data alla centralità della percezione, attraverso la valutazione delle correnti d'aria, del gradiente termico verticale (ovvero la differenza di temperatura percepita a livello della testa e dei piedi), dell'asimmetria radiativa (percezione aumentata verso pareti fredde e soffitti caldi) e della temperatura del pavimento.

I risultati sperimentali vengono elaborati in modo da fornire tabelle per la previsione termica in funzione dei parametri riscontrabili, utilizzate nelle normative americane ed europee degli anni '90 fino a tempi recenti.

3.3 Modello Adattivo

Il metodo di Fanger risulta però limitato poiché non considera la variabilità delle temperature esterne e fattori di tipo socio-culturale, trascurando la questione che il contesto e la storia termica di ciascun individuo possano modificare le aspettative e le preferenze termiche degli utenti.

Su questo filone critico si sviluppano le teorie del comfort adattivo i cui studi, introdotti da Humphreys e Nicol, iniziano negli anni '70 e si estendono fino a tempi recenti [331]. Tali teorie considerano il problema svincolato dall'impianto di climatizzazione.

L'approccio metodologico è quindi indirizzato verso lo studio del problema focalizzato sulle interazioni tra condizioni climatiche esterne e condizioni ambientali interne.

L'esperienza ci suggerisce che negli edifici è spesso desiderabile una temperatura interna che vari con le condizioni climatiche esterne: difatti, temperature considerate accettabili in estate, indossando abiti leggeri, potrebbero risultare estremamente calde in inverno, con abiti più pesanti. Questo è dovuto al fatto che l'aspettativa di esperienza termica in estate ed in inverno è differente e che noi, di conseguenza, modifichiamo il nostro comportamento.

Il principio adattivo che governa questi tipi di modelli, che cercano di tenere in considerazione gli aspetti fisiologici, psicologici, sociali e comportamentali degli utenti, è riassumibile nella frase *“Se un cambiamento sopraggiunge in modo da causare discomfort, le persone reagiscono in vari modi che tendono a ripristinare il loro comfort”*.

Il metodo del comfort adattivo deriva da una serie di studi statistici condotti in edifici reali e, poiché si è osservato che molto spesso le persone sono più tolleranti di quanto suggerisce il modello di Fanger, permette di ottenere comfort a costi energetici molto inferiori.

Le indagini svolte in edifici esistenti, soprattutto nel periodo estivo, hanno evidenziato l'importanza di vari fattori comportamentali, fisiologici e psicologici che influenzano l'aspettativa termica: la cultura, il genere, l'età, le abitudini, le condizioni di salute, la temperatura esterna, la possibilità di cambiare abito e intervenire sui sistemi di controllo, il tempo di esposizione e il tempo di acclimatazione dei soggetti.



Fig. 3.4: Tre tipologie di fattori che determinano l'adattamento.

In base a questi si distinguono tre tipi di adattamento (Figura 3.4):

- comportamentale, relativo ai cambiamenti che l'individuo mette in atto più o meno consciamente per modificare i parametri che regolano il bilancio termico del corpo. Può essere quindi personale (ad es. cambio d'abito), tecnologico (ad es. apertura delle finestre) o culturale (ad es. l'utilizzo del ventaglio);
- fisiologico, relativo alla capacità del corpo umano di variare i suoi caratteri alle condizioni ambientali, aumentando il grado di accettabilità;
- psicologico, in quanto le esperienze pregresse e le aspettative modificano la percezione degli stimoli sensoriali e la reazione ad essi.

In edifici naturalmente ventilati, dove gli occupanti possono regolare l'apertura e la chiusura delle finestre, le risposte termiche degli occupanti sono differenti da quelle riscontrate in edifici condizionati con sistemi HVAC.

Per questo motivo in tempi recenti gli standard internazionali e le Normative Europee (EN 15251:2007 [332]) hanno riconosciuto la possibilità che la temperatura di comfort possa cambiare in funzione delle condizioni climatiche esterne: le temperature di comfort accettabili vengono definite in base al tipo di sistema utilizzato, ovvero corrispondono al modello di Fanger nel caso in cui il raffrescamento sia fornito da un sistema HVAC, mentre fanno riferimento al modello adattivo se si utilizzano strategie di ventilazione naturale.

In tale contesto, la suddetta norma prevede differenti range di comfort nella stagione estiva in

presenza di ventilazione naturale.

Le equazioni (3.1) e (3.2) riportano rispettivamente il limite superiore e inferiore del range di comfort così calcolato²⁸:

$$\text{limite superiore:} \quad \Theta_{i \max} = 0,33\Theta_{rm} + 18,8 + 3 \quad (3.1)$$

$$\text{limite inferiore:} \quad \Theta_{i \min} = 0,33\Theta_{rm} + 18,8 - 3 \quad (3.2)$$

Nelle equazioni precedenti la temperatura esterna viene considerata all'interno di Θ_{rm} , che è una media delle temperature esterne, esponenzialmente ponderata, e può essere calcolata dalla seguente equazione approssimata:

$$\Theta_{rm} = \frac{(\Theta_{ed-1} + 0,8\Theta_{ed-2} + 0,6\Theta_{ed-3} + 0,5\Theta_{ed-4} + 0,4\Theta_{ed-5} + 0,3\Theta_{ed-6} + 0,2\Theta_{ed-7})}{3,8} \quad (3.3)$$

dove:

Θ_{ed-n} = temperatura media esterna dei giorni precedenti

Θ_{rm} = temperatura media esterna per il giorno considerato. Tale limite è applicabile per valori compresi tra $10^{\circ}\text{C} < \Theta_{rm} < 30^{\circ}\text{C}$ quando Θ_{rm} è limite superiore e $15^{\circ}\text{C} < \Theta_{rm} < 30^{\circ}\text{C}$ quando è limite inferiore.

Questo metodo risulta di particolare interesse poiché:

- permette di avere range di temperatura maggiori a 26°C (temperatura imposta dal modello di Fanger);
- permette di utilizzare un approccio passivo e tipologie di raffrescamento che si adattano al clima: la considerazione delle temperature medie settimanali (attraverso la media ponderata in funzione della distanza nel tempo di tali dati) sembrerebbe spingere all'utilizzo di sistemi dotati di risposta inerziale [332].

Il modello adattivo ha dimostrato di poter tener in maggior considerazione la variabilità delle condizioni climatiche, le strategie passive di controllo ambientale e la capacità dell'utenza di agire direttamente sulle variabili ambientali, riducendo i fabbisogni di climatizzazione a favore del risparmio di risorse economiche e ambientali.

²⁸ Il range di comfort riportato è quello relativo alla Categoria II, che corrisponde ad un normale livello di aspettativa, con un limite di ± 0.5 del PMV, e un PPD $< 10\%$.

3.3.1 Comfort estivo in climi umidi

La definizione del comfort termico estivo nei climi umidi non può limitarsi solamente ad un range di temperature ma deve considerare due ulteriori aspetti: l'umidità e la velocità dell'aria. Gli "indici" di comfort termico vengono spesso presentati sotto forma di temperature "equivalenti", definite a livelli standard di umidità e velocità dell'aria. Tuttavia, gli effetti del movimento dell'aria e dell'umidità sono particolarmente importanti nei climi caldo-umidi [333], nei quali il calore dissipato per evaporazione diventa una variabile predominante.

Ciò premesso, un'analisi teorica [334] suggerisce che laddove la velocità dell'aria sia al di sopra di 0,1 m/s²⁹ ed abbastanza costante nel tempo, le temperature di comfort possono essere incrementate di un valore equivalente a:

$$7 - \frac{50}{4 + 10 \cdot v^{0,5}} \quad [^{\circ}C] \quad (3.4)$$

In Figura 3.5 viene riportato l'incremento delle temperature di comfort in funzione della velocità dell'aria, che permette di innalzare il limite superiore del range calcolato con la (3.1).

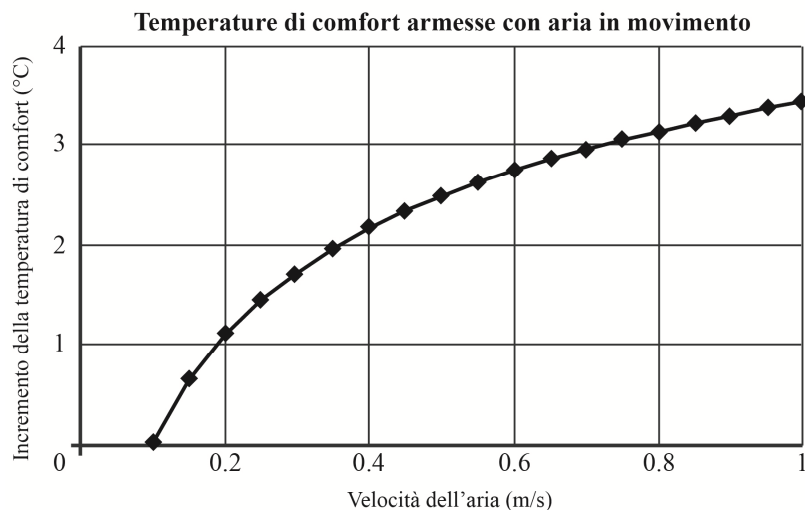


Fig. 3.5: Aumento della temperatura di comfort per diverse velocità dell'aria.

²⁹ Limite al di sotto del quale il movimento dell'aria non viene percepito dal corpo umano.

Risulta invece più difficile tener conto dell'effetto dell'umidità, innanzitutto per una questione di misurazione. Generalmente nella stima del comfort si considera l'umidità relativa³⁰, ma essendo questa una misura dipendente dalla temperatura dell'aria si considera più robusta la misurazione della pressione di vapore nell'aria (P_a).

La perdita di calore per dissipazione degli individui è data dalla differenza tra la pressione di saturazione del vapore sulla superficie della pelle e la pressione di vapore P_a nell'aria circostante. Considerando che per questioni di termoregolazione la temperatura della pelle rimane pressoché costante, anche la pressione di vapore acqueo sulla superficie della pelle può essere ritenuta più o meno costante; in questo modo la pressione di vapore nell'aria P_a può essere considerata un buon previsore della perdita di calore per evaporazione.

Generalmente si ipotizza che in condizioni calde, nelle quali le perdite di calore metaboliche per convezione e radiazione diminuiscono e la maggior parte delle perdite avvengono per evaporazione, ad un aumento dell'umidità corrisponda un aumento del discomfort; e come conseguenza, in caso di elevata umidità, data la difficoltà di disperdere il calore per evaporazione, viene ipotizzato che siano richieste temperature di comfort inferiori e ciò è dimostrato da alcuni dati sperimentali [335].

Queste investigazioni sperimentali, condotte su individui in condizioni caldo-umide, hanno determinato che l'influenza della P_a sul comfort era piccola quando i soggetti si trovavano a proprio agio, ma aveva un effetto marcato quando si assisteva a cambi di temperatura: in un ambiente umido, infatti, le persone tollerano cambiamenti di temperatura più piccoli di quelli tollerati in ambiente secco.

Se da una parte quindi la velocità dell'aria può innalzare il limite superiore del range di comfort in climi secchi, elevati tassi di umidità possono invece richiedere l'abbassamento della temperatura di comfort di circa 1°C, provocando come effetto principale, in ogni caso, una riduzione dell'ampiezza del range di comfort.

³⁰ Rapporto della densità del vapore acqueo contenuto nell'aria umida e la densità del vapore saturo alla temperatura della miscela.

4. Modelli fisico-matematici

4.1 Premessa

I modelli di analisi energetica degli edifici nascono originariamente con l'obiettivo di quantificare i carichi di riscaldamento e raffrescamento necessari per il mantenimento del comfort interno, al fine di dimensionare l'impianto di climatizzazione e prevederne orientativamente i consumi.

In genere, tali modelli tengono in considerazione gli scambi termici tra interno ed esterno, le potenze dei carichi esterni (apporti solari) ed interni (occupanti ed attrezzature) e le caratteristiche termo-fisiche dell'involucro e degli ambienti dell'edificio [336].

Dal punto di vista fisico, l'edificio viene modellato come un sistema termodinamico aperto, cioè che consente lo scambio di massa (aria) e/o energia (calore) con l'ambiente mediante la sua frontiera (la superficie esterna dell'edificio).

Il sistema edificio viene definito mediante le seguenti componenti:

- variabili di input, cioè le forzanti che agiscono sul sistema (dati climatici, comportamento degli occupanti, etc.), con annesse condizioni al bordo ed iniziali;
- parametri, che definiscono le proprietà del sistema (proprietà termofisiche della struttura, potenza dell'impianto, etc.);
- variabili di output, ovvero le variabili dipendenti (temperatura, umidità e velocità dell'aria, etc.) che descrivono la risposta del sistema alle variabili in ingresso.

Dal punto di vista dell'ambito di applicazione e delle condizioni al contorno, i modelli di analisi energetica possono essere classificati come segue:

- in base al sistema fisico preso in considerazione (edificio, impianti, generatori termici);
- in base alla scala spaziale (singolo ambiente, insieme di ambienti, intero edificio);
- in base alla variazione temporale delle condizioni al contorno.

In relazione a quest'ultimo punto, è possibile considerare:

- il regime stazionario, in cui tutte le grandezze (temperature, flussi termici, etc.) sono costanti nel tempo. I dati delle condizioni al contorno sono aggregati nel tempo, mediante l'adozione di un valore medio mensile o stagionale (per il calcolo del consumo energetico), oppure mediante il valore di picco (per il dimensionamento degli impianti).
- il regime dinamico, in cui tutte le grandezze sono variabili nel tempo. I dati vengono scanditi mediante un *time step*, generalmente l'ora nelle simulazioni degli edifici.

Per tali motivi, i modelli dinamici sono i soli a poter tener conto degli effetti inerziali dovuti alle masse termiche interne e del loro accumulo termico³¹. Per questo risultano gli unici adatti al fine di poter stimare gli effetti di raffrescamento indotti dalla ventilazione naturale negli edifici massivi del patrimonio.

Ad oggi, i modelli dinamici possono dividersi in due macro-categorie: multi-zona e CFD [337]. Di seguito viene proposta una trattazione delle due categorie al fine di poterne determinare potenzialità e limiti.

³¹ *Risulta interessante notare come l'utilizzo di modelli dinamici, sebbene sviluppati già negli anni '70, sia divenuto diffuso solo in anni recenti. Tale carenza modellistica trova spiegazione nell'assenza di specifiche prescrizioni di legge in materia: solo nelle più recenti normative europee si introduce difatti la necessità di una metodologia di calcolo dinamico, attualmente imposta solo ad edifici di nuova costruzione con volumetria maggiore ai 10.000 mc [408].*

4.2 Modelli multi-zona

4.2.1 Generalità

I modelli multi-zona permettono di valutare il comportamento energetico di un edificio e del relativo sistema impiantistico nell'arco di un intero anno solare.

A fronte di una così ampia scala temporale, il comportamento termico dell'edificio viene modellato in una maniera semplificata, tramite un modello monodimensionale (un grafo composto da nodi e rami) con un numero limitato di dati (aree delle superfici delle pareti, volumi degli ambienti, conducibilità, capacità termica, spessore dei materiali, etc.) e di variabili (temperatura, umidità, etc.).

Il modello fisico-matematico è basato sulle equazioni di bilancio dei nodi del grafo, che consentono di tener conto delle variazioni temporali delle temperature interne ed esterne, dell'ingresso e uscita di masse d'aria, dell'inerzia termica delle masse dell'edificio e del regime di funzionamento dell'impianto.

Le equazioni di bilancio vengono generalmente risolte avvalendosi di un software sulla base di un intervallo temporale di un'ora che si avvale dell'uso di un file climatico, contenente i valori orari di temperatura, umidità, velocità del vento, radiazione solare, relativi al sito dell'edificio.

Di seguito vengono riportate alcune descrizioni matematiche di questo tipo di modello termico, prevalentemente al fine di comprenderne l'efficacia nella simulazione del fenomeno della ventilazione naturale e raffrescamento delle masse termiche.

A tal scopo, la trattazione che segue si focalizza solamente sui seguenti aspetti:

- ipotesi semplificative alla base dei modelli "multi-zona" e definizione di zona termica;
- bilancio energetico dell'aria della zona presa in considerazione, includendo scambi di massa e/o energia con l'esterno, con le superfici interne dell'involucro, con le portate degli impianti di climatizzazione, con le zone adiacenti, con i carichi interni;
- conduzione attraverso le pareti, in particolar modo al fine di valutare l'accumulo termico in esse.

4.2.2 Ipotesi semplificative

I modelli "multi-zona" descrivono un edificio come un insieme di "zone termiche", ossia regioni dello spazio ritenute omogenee per temperatura interna e condizioni al contorno e serviti da uno stesso impianto.

Ogni zona termica viene attribuita ad un nodo del grafo che rappresenta il modello geometrico

dell'edificio (Figura 4.1).

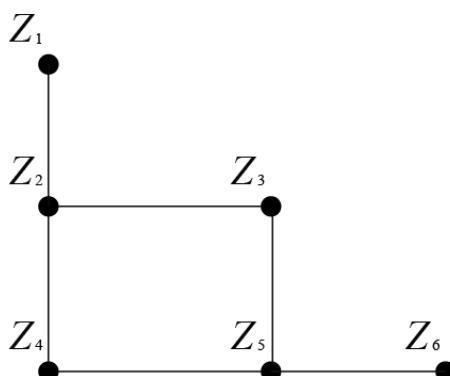


Figura 4.1: grafo tipo, modello geometrico dell'edificio.

Per ogni nodo del grafo, e quindi per ogni zona, viene scritta un'equazione di bilancio termico. Gli scambi termici sono stazionari nell'intervallo di tempo considerato (in genere un'ora).

Risolvendo il sistema delle equazioni di bilancio, in numero pari al numero di zone dell'edificio, il modello multi-zona fornisce una vista macroscopica del suo comportamento energetico.

In sostanza, l'estrema semplificazione geometrica, sia per quanto riguarda l'involucro (trattamento semplificato dei ponti termici) che per quanto riguarda l'aria (considerata una massa concentrata in un punto), implica una monodimensionalità dei flussi termici.

Nonostante queste forti semplificazioni, nei modelli multi-zona si può tener conto degli effetti inerziali, ossia dell'accumulo termico all'interno di una massa.

In questo contesto, una massa termica comunque estesa è ridotta ad un punto geometrico (in cui si considera concentrata la capacità termica dell'intera massa) e ad un solo valore della temperatura.

Nel paragrafo nominato "*Building Mass Effects*" dell'ASHRAE Handbook del 1999 [338] questi concetti sono espressi dalla seguente equazione:

$$\dot{Q}_s = \rho c_p V \left(\frac{dT_s}{dt} \right) = h_0 A (T_s - T) \quad [KW] \quad (4.1)$$

in cui:

\dot{Q}_s = potenza termica scambiata tra massa e ambiente [kW];

ρ = densità di massa del materiale [kg/m³];

c_p = calore specifico a volume costante del materiale [kJ/kg·K];

V = volume della massa termica [m³];

t = tempo [s];

h_0 = coefficiente di trasferimento, somma di quello radiativo e convettivo ($h_c + h_r$) [W/m²·K];

A = area della superficie di scambio [m²];

T_s = temperatura della massa termica [K];

T = temperatura media dell'ambiente [K].

Il primo membro dell'equazione (4.1) esprime la circostanza che ogni massa termica può immagazzinare nell'intervallo temporale dt , dell'energia termica in proporzione alla sua massa, al suo calore specifico, e alla differenza tra la sua temperatura e la temperatura dell'ambiente. Questa potenza termica \dot{Q}_s viene detta accumulo termico.

In aggiunta, il secondo membro della (4.1) dice che la potenza \dot{Q}_s ceduta da una massa termica all'ambiente è direttamente proporzionale alla superficie esposta allo scambio, alla differenza di temperatura tra la massa e l'ambiente e al coefficiente di scambio termico; il valore di \dot{Q}_s è pertanto fortemente influenzato dal moto dell'aria a contatto con la superficie e dalla finitura superficiale dell'elemento medesimo, cioè da aspetti convettivi e radiativi del fenomeno di scambio solido-fluido.

In particolare è il coefficiente h_0 riassume le caratteristiche del moto dell'aria intorno alla massa termica e il trasferimento di massa e di energia nell'aria medesima e tra l'aria e la massa termica. Tale coefficiente è il frutto di prove sperimentali che ne hanno consolidato i valori in letteratura a seconda del caso (materiale della superficie radiante, regime di moto del fluido, etc).

4.2.2 Equazioni di bilancio energetico

Come precedentemente detto, l'edificio può essere considerato un sistema termodinamico aperto, che consente scambi di energia e massa con l'ambiente esterno, delimitato dalla superficie interna dell'involucro.

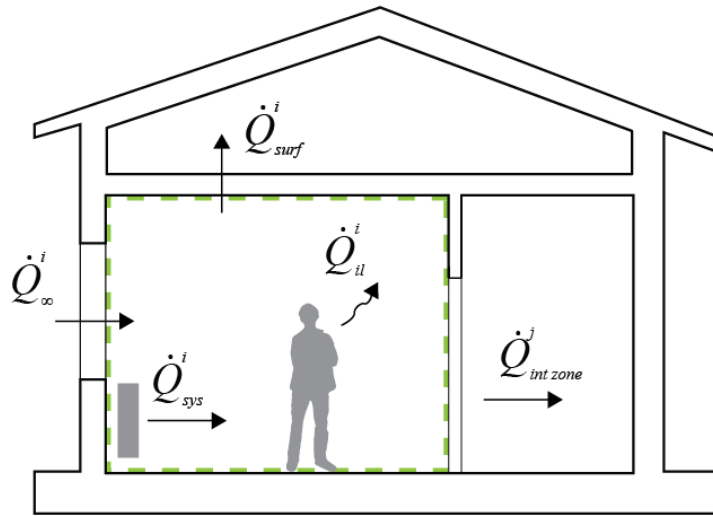


Figura 4.2: bilancio termico della zona.

In relazione a una singola zona, evidenziata in Figura 4.2, vale la seguente equazione di bilancio in termini di potenza termica istantanea riferita al generico intervallo di tempo dt:

$$c_z^i \frac{dT_z^i}{dt} = \dot{Q}_{il}^i + \dot{Q}_{surf}^i + \dot{Q}_{int\ zone}^i + \dot{Q}_{\infty}^i + \dot{Q}_{sys}^i \quad [kW] \quad (4.2)$$

dove:

z = indice della zona;

i = indice della zona i -esima;

c_z^i = capacità termica dell'aria della zona i -esima [kJ/kg · K], definita da $c_z^i = \rho c V^i$ in cui ρc = capacità termica massica dell'aria della zona i -esima e V^i = volume d'aria della zona i -esima.

T_z^i = temperatura della zona i -esima [K];

t = tempo [s];

\dot{Q} = generica potenza termica istantanea [kW];

il = indice dei carichi interni;

$surf$ = indice delle superfici interne;

$int\ zone$ = indice delle zone adiacenti che interagiscono con la zona i -esima;

∞ = indice dell'infiltrazione dall'esterno;

sys = indice degli impianti.

L'equazione di bilancio (4.2) eguaglia la potenza termica istantanea accumulata nella massa

della zona i-esima $c_z^i \frac{dT_z^i}{dt}$ alla somma dei diversi contributi di potenza termica di seguito elencati:

- $\dot{Q}_{il}^i = \sum_{k=1}^{N_{il}} \dot{Q}_{il,k}^i$ =somma dei k-esimi carichi termici interni;
- $\dot{Q}_{surf}^i = \sum_{k=1}^{N_{surf}} h_{s,k}^i A_{s,k}^i (T_{s,k}^i - T_z^i)$ = potenza termica trasmessa per convezione-irraggiamento dalle k-esime superfici interne della zona i-esima, dove:
 - $h_{s,k}^i$ = coefficiente di scambio termico convettivo/radiativo della k-esima superficie interna della zona i-esima,
 - $A_{s,k}^i$ = area della k-esima superficie interna della zona i-esima,
 - $T_{s,k}^i$ = temperatura della superficie interna della zona i-esima;
- $\dot{Q}_{int\ zone}^i = \sum_{j=1}^{int\ zone} \dot{m}_z^j c_z^i (T_z^j - T_z^i)$ = potenza termica trasmessa per mescolamento dell'aria della zona i-esima e le zone j-esime adiacenti che interagiscono con essa, dove:
 - \dot{m}_z^j portata massica d'aria scambiata tra la zona i-esima e la zona j-esima adiacente,
 - T_z^j = temperatura dell'aria della zona j-esima;
- $\dot{Q}_{\infty}^i = \dot{m}_{\infty}^j c_z^i (T_{\infty} - T_z^i)$ = potenza termica trasmessa per infiltrazione dell'aria esterna:
 - \dot{m}_{∞}^j = portata massica d'aria scambiata tra la zona i-esima e l'esterno,
 - T_{∞} = temperatura dell'aria esterna;
- $\dot{Q}_{sys}^i = \dot{m}_{sys}^i c_z^i (T_{sys}^i - T_z^i)$ = potenza termica degli impianti, dove:
 - \dot{m}_{sys}^i = portata massica d'aria fornita dagli impianti alla zona i-esima,
 - T_{sys}^i = temperatura dell'aria fornita dagli impianti alla zona i-esima.

Infine, l'equazione (4.2) può essere riscritta come segue:

$$c_z^i \frac{dT_z^i}{dt} = \sum_{k=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_{il,k}^i + \sum_{k=1}^{N_{surf}} h_{s,k}^i A_{s,k}^i (T_{s,k}^i - T_z^i) + \sum_{j=1}^{int\ zone} \dot{m}_z^j c_z^i (T_z^j - T_z^i) + \dot{m}_{\infty}^j c_z^i (T_{\infty} - T_z^i) + \dot{m}_{sys}^i c_z^i (T_{sys}^i - T_z^i) \quad [kW] \quad (4.3)$$

In un edificio composto da n zone, il modello matematico è un sistema di n equazioni differenziali del tipo (4.3), una per ogni zona. Per risolvere questo sistema, i software di calcolo multi-zona utilizzano differenti algoritmi numerici.

In particolare *EnergyPlus*, uno dei software multi-zona comunemente in uso, utilizza algoritmi risolutivi basati su tre differenti metodi di integrazione: l'*EulerMethod* (approssimazione alle differenze finite utilizzando l'ipotesi di Eulero), il *3rdOrderBackwardDifference* (approssimazione alle differenze finite all'indietro utilizzando un'espansione in serie di Taylor troncata fino al terzo ordine) e l'*AnalyticalSolution* (ovvero la soluzione analitica). [339]

Si riporta a titolo di esempio il primo dei tre metodi al fine di comprenderne caratteristiche e limiti.

L'*EulerMethod* usa l'approssimazione alle differenze finite per calcolare il termine di derivazione rispetto al tempo, attraverso l'utilizzo della formula di Eulero:

$$\frac{dT_z^i}{dt} = \frac{(T_z^i(t) - T_z^i(t - \Delta t))}{\Delta t} + 0(\Delta t) \quad (4.4)$$

Sostituendo la (4.4) nella (4.3), si ottiene:

$$\begin{aligned} c_z^i \frac{(T_z^i(t) - T_z^i(t - \Delta t))}{\Delta t} + T_z^i(t) \left(\sum_{k=1}^{Nsurf} h_{s,k}^i A_{s,k}^i + \sum_{j=1}^{int\ zone} \dot{m}_z^j c_z^i + \dot{m}_\infty^j c_z^i + \dot{m}_{sys}^i c_z^i \right) = \\ \sum_{k=1}^{Nil} \dot{Q}_{il,k}^i(t) + \dot{m}_{sys}^i c_z^i T_{sys}^i(t) + \left(\sum_{k=1}^{Nsurf} h_{s,k}^i A_{s,k}^i T_{s,k}^i + \sum_{j=1}^{int\ zone} \dot{m}_z^j c_z^i + \dot{m}_\infty^j c_z^i \right) (t - \Delta t) \quad [kW] \end{aligned} \quad (4.5)$$

Esplicitando il termine della temperatura della zona i-esima all'istante di tempo t, al fine di determinarne il valore, l'equazione (4.5) può essere scritta come segue:

$$T_z^i(t) = \frac{\sum_{k=1}^{Nil} \dot{Q}_{il,k}^i(t) + \dot{m}_{sys}^i c_z^i T_{sys}^i(t) + \left(\sum_{k=1}^{Nsurf} h_{s,k}^j A_{s,k}^i T_{s,k}^i + \sum_{j=1}^{int\ zone} \dot{m}_z^j c_z^i + \dot{m}_\infty^j c_z^i \right) (t - \Delta t)}{c_z^i \frac{(T_z^i(t) - T_z^i(t - \Delta t))}{\Delta t} + \left(\sum_{k=1}^{Nsurf} h_{s,k}^i A_{s,k}^i + \sum_{j=1}^{int\ zone} \dot{m}_z^j c_z^i + \dot{m}_\infty^j c_z^i + \dot{m}_{sys}^i c_z^i \right)} \quad (4.6)$$

L'equazione (4.6) può essere dunque utilizzata per stimare la temperatura nella zona i-esima.

La scelta di effettuare l'approssimazione di Eulero definita dalla (4.4) consente di trasformare un sistema di equazioni differenziali naturalmente accoppiato in un sistema di equazioni algebriche in cui le incognite sono disaccoppiate e quindi le equazioni possono essere risolte una per volta in accordo con la (4.6). Questo si può fare perché le temperature delle j-esime

zone che interagiscono con la zona i-esima compaiono nella (4.6) valutate nell'istante precedente a quello attuale ($t - \Delta t$), quindi non sono più variabili ma sono termini noti.

4.2.3 Conduzione attraverso le pareti

Le equazioni di bilancio necessitano del valore della temperatura interna delle pareti di ogni zona all'istante t . Questa temperatura può essere calcolata in funzione della temperatura della zona i-esima all'istante t mediante le seguenti equazioni (4.4) e (4.5), a patto di conoscere il flusso convettivo/radiativo tra la parete e la zona interna.

$$\dot{q}(t) = h_i(T_{s,k}(t) - T_{zi}(t)) \quad [kW/m^2] \quad (4.4)$$

$$T_{s,k}(t) = \frac{\dot{q}(t)}{h_i} + T_{zi}(t) \quad [K] \quad (4.5)$$

dove:

$\dot{q}(t)$ = flusso termico;

h_i = coefficiente di scambio termico relativo alla superficie interna;

$T_{s,k}$ = temperatura superficiale della parete;

T_{zi} = temperatura della zona i-esima;

t = tempo.

Esistono in letteratura metodi numerici che hanno come obiettivo un calcolo rapido ancorché approssimato di tale flusso termico.

Di seguito viene riportato quello proposto da Stevenson & Mitalas [340] e Seem [341]. Questo metodo, chiamato metodo delle funzioni di trasferimento conduttive, collega il flusso riferito a una superficie di un elemento alla serie infinita delle storie delle temperature ad entrambi i lati dell'elemento stesso, per il tramite di coefficienti chiamati fattori di risposta (si rimanda ai riferimenti bibliografici per un maggior approfondimento della teoria su cui questo metodo si basa).

A scopo esemplificativo, facciamo vedere come Seem [341] risolve il problema nel caso di una parete omogenea (mono-strato), imponendo una griglia alle differenze finite e a parametri concentrati.

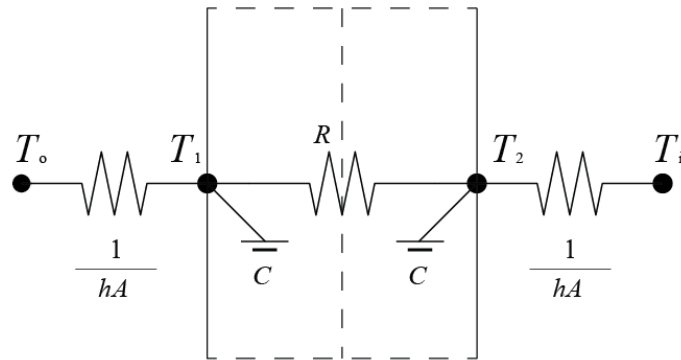


Figura 4.3: discretizzazione della parete, descritta mediante quattro nodi a parametri concentrati.

In tal caso, riferendoci alla Figura 4.3, oltre al nodo della temperatura esterna e al nodo della interna zona, vengono introdotti altri due nodi, uno sulla faccia esterna e uno su quella interna della parete. Ad ognuno dei due nodi addizionali viene attribuita una massa e quindi una capacità termica pari alla metà della parete, e per entrambi i nodi vengono scritte delle equazioni di bilancio termico, che esprimono la variazione della temperatura della massa nel tempo come effetto della somma dei flussi termici radiativi/convettivi e conduttivi che arrivano dai nodi limitrofi (Figura 4.4).

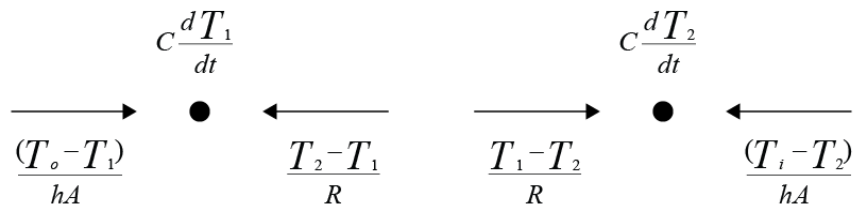


Figura 4.4: Bilancio termico effettuato sui nodi 1 e 2 della griglia.

Nel nostro caso, le equazioni di bilancio termico dei due nodi assumono le seguenti espressioni:

$$C \frac{dT_1}{dt} = hA(T_o - T_1) + \frac{T_2 - T_1}{R} \quad (4.6)$$

$$C \frac{dT_2}{dt} = hA(T_i - T_2) + \frac{T_1 - T_2}{R} \quad (4.7)$$

dove:

C = capacità termica attribuita al nodo

h = coefficiente di scambio termico

A = area della superficie

R = resistenza termica della parete

T_o = temperatura esterna

T_i = temperatura interna

T_1 = temperatura superficiale attribuita al nodo 1

T_2 = temperatura superficiale attribuita al nodo 2

In particolare, la resistenza e la capacità termica attribuita al nodo³² assumono rispettivamente le seguenti espressioni:

$$R = \frac{l}{kA} \quad (4.8)$$

$$C = \frac{\rho c l A}{2} \quad (4.9)$$

dove:

l = spessore del muro

A = superficie

k = conducibilità termica

ρc = la capacità termica massica

Chiamando ora $\{\mathbf{x}\}$ il vettore delle variabili di stato definito come:

$$\{\mathbf{x}\} = \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{Bmatrix} \quad (4.10)$$

e definendo il vettore della sua derivata temporale:

³² Poiché la capacità termica viene divisa per i due nodi, quella attribuita ad un singolo nodo corrisponde alla metà della capacità totale.

$$\left\{ \frac{d\mathbf{x}}{dt} \right\} = \begin{Bmatrix} \frac{dT_1}{dt} \\ T_2 \\ \frac{dT_2}{dt} \end{Bmatrix} \quad (4.11)$$

chiamando inoltre $\{\mathbf{u}\}$ il vettore dei termini noti espresso da:

$$\{\mathbf{u}\} = \begin{Bmatrix} T_i \\ T_o \end{Bmatrix} \quad (4.12)$$

le due equazioni (4.6) e (4.7) assumono la seguente forma matriciale:

$$\left\{ \frac{d\mathbf{x}}{dt} \right\} = [\mathbf{A}]\{\mathbf{x}\} + [\mathbf{B}]\{\mathbf{u}\} \quad (4.13)$$

dove:

$$[\mathbf{A}] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} - \frac{hA}{C} & \frac{1}{RC} \\ \frac{1}{RC} & -\frac{1}{RC} - \frac{hA}{C} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$[\mathbf{B}] = \begin{bmatrix} \frac{hA}{C} & 0 \\ 0 & \frac{hA}{C} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Alla (4.13) si aggiunge l'equazione del flusso termico attraverso la superficie interna (che equivale ad una riscrittura dell'equazione 4.4):

$$\dot{q}(t) = h(T_2 - T_i) \quad (4.16)$$

La (4.16) può essere a sua volta espressa in termini matriciali attraverso la definizione del vettore delle variabili di output $\{\mathbf{y}\}$:

$$\{\mathbf{y}\} = \dot{q}(t) \quad (4.17)$$

e dalle matrici $[\mathbf{C}]$ e $[\mathbf{D}]$ così definite:

$$[\mathbf{C}] = [h \quad 0] \quad (4.18)$$

$$[\mathbf{D}] = [0 \quad -h] \quad (4.19)$$

Ciò premesso la (4.16) assume la seguente forma:

$$\{\mathbf{y}\} = [\mathbf{C}]\{\mathbf{x}\} + [\mathbf{D}]\{\mathbf{u}\} \quad (4.17)$$

Attraverso l'uso dell'algebra matriciale il vettore delle variabili di stato $\{\mathbf{x}\}$ può essere eliminato dal sistema delle equazioni e il vettore delle variabili di output $\{\mathbf{y}\}$ può essere collegato direttamente al vettore di input $\{\mathbf{u}\}$ e alle storie temporali del vettore di input $\{\mathbf{u}\}$ e del vettore delle variabili di output medesimo.

Seem [341] dimostra che una buona approssimazione del flusso termico convettivo/radiativo tra la parete e la zona i -esima dipende soltanto dai valori delle temperature interne ed esterne nell'istante attuale (t) e nei due istanti precedenti ($t - \Delta t$) e ($t - 2\Delta t$), e dai valori del flusso medesimo nei due istanti ($t - \Delta t$) e ($t - 2\Delta t$) precedenti a quello attuale (t). Pertanto, tale procedimento permette di esprimere il flusso termico all'istante (t) in funzione di soli valori noti e consente quindi di valutare la temperatura interna della parete all'istante (t) tramite l'equazione (4.5).

4.2.4 Considerazioni finali sui modelli multi-zona

A questo punto possiamo effettuare alcune considerazioni:

- i modelli multi-zona permettono di descrivere con facilità l'edificio attraverso un numero limitato di equazioni, cosa che consente di modellare il comportamento energetico di un edificio in un lungo intervallo temporale a bassissimo costo computazionale;
- con lo stesso basso costo computazionale vengono stimate (attraverso l'utilizzo delle funzioni di trasferimento) le temperature interne delle pareti, necessarie per risolvere le

equazioni di bilancio;

- i modelli multi-zona discretizzano un ambiente, seppur complesso, in un solo nodo, ovvero effettuano una media delle temperature dell'aria espressa dal concetto di "zona termica". Di fatto vengono trascurate le caratteristiche geometriche della zona, come la distribuzione spaziale delle temperature, i gradienti termici che si innescano all'interno del fluido (moti convettivi), etc.;
- questo metodo dà per scontato che, in presenza di masse termiche, un eventuale carico di raffrescamento raggiunga completamente tale massa, prescindendo dalla descrizione spaziale del fenomeno. Per questo motivo, gli effetti inerziali vengono fortemente approssimati;
- in aggiunta a ciò, proprio in relazione alla presenza di grandi masse termiche (come nel caso di pareti massive), questo metodo non permette di capire qual è lo spessore coinvolto da un'eventuale portata di raffrescamento. La vera approssimazione sta nella difficoltà di capire con chiarezza questa percentuale e di capire se talune conformazioni interne dell'edificio impediscano l'interazione tra la portata di raffrescamento e la massa;
- inoltre, risulta macchinoso descrivere, nell'equazione di bilancio, l'eventuale presenza di elementi massivi interni alla zona termica e non facenti parte delle pareti di bordo della zona. A tal scopo è pratica comune [339] considerare tali masse termiche in equilibrio con la zona stessa, includendole, attraverso una media, nella capacità termica dell'aria.

4.3 Modelli CFD

4.3.1 Generalità

Il vantaggio delle simulazioni termo-fluido dinamiche è quello di superare l'approssimazione geometrica dei modelli macroscopici multi-zona, fornendo una risoluzione al problema molto dettagliata dal punto di vista delle variabili spaziali. L'aspetto principale è relativo quindi alla considerazione delle caratteristiche geometriche tridimensionali, che influenzano in modo decisivo gli scambi termici convettivi che avvengono tra i vari flussi d'aria e tra l'aria stessa ed i solidi.

Tramite i modelli CFD è possibile stimare:

- gli effetti indotti dalle forze esterne di moto dell'aria in relazione alla geometria dell'edificio, mediante modelli di pura fluidodinamica, che considerano solo gli aspetti del moto del fluido trascurando gli aspetti termici. Tali studi risultano utili nella valutazione, in fase preliminare, degli aspetti puramente aerodinamici riguardo al flusso in entrata o uscita dalle finestre (ad esempio nel caso di ostruzioni esterne).
- gli effetti legati alle forze di galleggiamento e quindi ai gradienti di pressione all'interno dell'ambiente, che generano il fenomeno della convezione naturale. In questo caso è necessario impostare un modello che tenga in considerazione gli effetti della termica accoppiati a quelli della fluidodinamica;
- gli effetti dovuti alla combinazione tra le forze esterne e le forze di galleggiamento. Tale fenomeno ha il nome di convezione mista o, nel caso di perdita degli effetti dati dalle forze di galleggiamento, convezione forzata.

4.3.2 Equazioni della termo-fluido dinamica

Nomenclatura

V	volume, m^3
S	superficie, m^2
ρ	densità, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
p	pressione, Pa
\mathbf{u}	velocità, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
T	temperatura, K
g	gravità, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
t	tempo, s
μ	viscosità dinamica, $\text{Pa}\cdot\text{s}$
c_v	calore specifico a volume costante, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
c_p	calore specifico a pressione costante, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
k	conducibilità termica, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

4.3.2.1 Fluidi come sistemi continui

La termo-fluido dinamica è una branca della termo meccanica che descrive con modelli matematici il comportamento fisico dei fluidi soggetti a gradienti di pressione e/o di temperatura [342].

Alla scala dei fenomeni che noi stiamo considerando, l'aria viene modellata come un mezzo continuo che occupa una regione definita dello spazio, ossia un volume delimitato da una superficie, che rappresenta la sua frontiera rispetto allo spazio esterno, tramite la quale avviene la maggior parte dell'interazione tra l'aria nella regione confinata e l'ambiente circostante (Figura 4.3).

Questa interazione viene modellata assegnando alla frontiera dei valori della temperatura o del flusso termico, della pressione o della velocità. Queste condizioni assegnate alla frontiera, detta "bordo", completano le equazioni fondamentali della termo-fluido dinamica, consentendo di determinare i valori di velocità, temperatura, pressione e densità in ogni punto dello spazio confinato.

I problemi della termo-fluido dinamica possono essere formulati in maniera stazionaria, ossia indipendenti dal tempo, o non stazionaria o transitoria, ossia dipendenti dal tempo; in quest'ultimo caso, le variabili fondamentali vengono a dipendere non solo dalla posizione

all'interno della regione in esame, ma anche dall'istante di tempo t e nella formulazione del problema devono essere inseriti i valori delle variabili fondamentali noti all'istante iniziale.

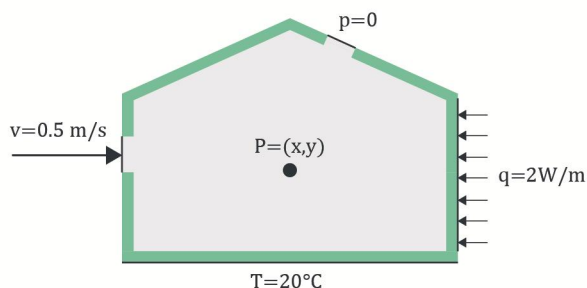


Fig. 4.3: regione confinata, frontiera ed esempi di condizioni al bordo. Esplicitazione delle variabili del problema.

Come precedentemente affermato, l'aria è modellata come un mezzo continuo; questo vale a dire che i fenomeni fisici vengono osservati ad una scala macroscopica, in cui i punti materiali sono identificabili con i punti geometrici della regione. Nei punti è definita una densità di massa ed ogni sotto regione dello spazio è dotata di massa. Il mezzo continuo, sia solido che fluido, è ipotizzato deformabile, poiché durante il moto le sue parti sono soggette a variazioni di forma e volume.

Lo studio dei corpi continui mette in relazione la caratterizzazione cinematica del corpo studiato alle forze applicate alla sua densità di massa. Tali relazioni possono essere di due tipi:

- equazioni fondamentali;
- leggi costitutive.

Le prime racchiudono le equazioni di bilancio fondamentali, come le leggi di conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia, che governano l'evoluzione delle tre grandezze meccaniche fondamentali (massa, moto ed energia) nel tempo.

Le seconde identificano il tipo di fluido considerato (viscoso, comprimibile, incomprimibile, etc.) e legano lo stato di tensione in ciascun punto del campo fluido con la deformazione del fluido stesso.

4.3.2.2 Alcuni concetti matematici di base

Le proprietà del fluido considerato possono essere descritte con campi scalari (temperatura, densità, etc.) o campi vettoriali (velocità, quantità di moto, etc.), come quelli riportati a scopo esemplificativo in Figura 4.4.



Fig. 4.4: esempio di campo scalare (a sinistra), ad es. delle temperature, rappresentato da “iso-superfici” indicanti il valore numerico ($^{\circ}\text{C}$); esempio campo vettoriale (a destra), ad es. delle velocità, rappresentato da vettori di cui è necessario conoscere, oltre all'intensità, la direzione e il verso.

Introduciamo alcuni operatori differenziali che permettono di descrivere il tasso di variazione spaziale di tali grandezze, i quali utilizzano l'operatore *nabla* (indicato con il simbolo ∇) definito da:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k} \quad (4.19)$$

L'operatore *nabla* viene utilizzato per esprimere in maniera sintetica la variazione spaziale di una funzione (scalare o vettoriale). Nel nostro caso di studio, tale operatore viene utilizzato per descrivere alcuni campi (come quello della velocità, della densità o delle temperature) attraverso tre particolari operatori differenziali:

Gradiente di un campo scalare:

$$\nabla f(x, y, z) = \frac{\partial f}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial f}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial f}{\partial z} \mathbf{k} \quad (4.20)$$

Divergenza di un campo vettoriale:

$$\nabla \cdot \mathbf{F}(x, y, z) = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \quad (4.21)$$

Laplaciano di un campo scalare:

$$\nabla^2 f(x, y, z) = \nabla \cdot \nabla f(x, y, z) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \quad (4.22)$$

Il gradiente di un campo scalare $f(x, y, z)$ è un campo vettoriale; la divergenza di una funzione vettoriale $\mathbf{F}(x, y, z)$ è il prodotto scalare tra il vettore operatore *nabla* e la funzione stessa, dal

quale si ottiene un campo scalare (che è dato dalla somma algebrica delle derivate parziali delle tre componenti); il Laplaciano di un campo scalare $f(x, y, z)$ è la divergenza del gradiente della funzione, dunque un campo scalare.

Tali concetti vengono riassunti nella Tabella 4.1.

Campo di origine	Operatore	Campo risultante
<i>Scalare</i>	<i>Gradiente</i>	<i>Vettoriale</i>
<i>Vettoriale</i>	<i>Divergenza</i>	<i>Scalare</i>
<i>Scalare</i>	<i>Laplaciano</i>	<i>Scalare</i>

Tab. 4.1: Gradiente, divergenza e laplaciano, alcune applicazioni dell'operatore nabla.

4.3.2.3 Approccio Euleriano e Lagrangiano

Le proprietà caratterizzanti un modello di continuo (densità, velocità, quantità di moto, etc.) possono essere studiate seguendo due differenti approcci:

- approccio Lagrangiano (o materiale), basato sullo studio delle traiettorie delle singole particelle, adottato tipicamente nella descrizione del moto di un corpo solido nello spazio. La velocità è una funzione vettoriale del tempo e di ogni punto materiale P che costituisce il corpo $\mathbf{u}(P, t)$.
- approccio Euleriano (o spaziale), basato sullo studio delle proprietà di campi spaziali. Il vettore velocità è una funzione vettoriale $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ delle posizioni nello spazio e del tempo e rappresenta la velocità con cui gli elementi del fluido transitano all'istante t per il punto di coordinate $\mathbf{x}(x, y, z)$.

Le due velocità, “lagrangiana” e ed “euleriana”, sono evidentemente numericamente uguali, ovvero se un certo elemento di fluido ad un istante t si trova in un punto \mathbf{x} con velocità (lagrangiana) $\mathbf{u}(t)$, questo stesso valore coincide con la velocità (euleriana) $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ nel punto \mathbf{x} all'istante t ; quello che cambia tra le due è il punto di vista, ovvero se l'osservatore è fissato in un determinato punto dello spazio (euleriano) oppure se è “a cavallo” della particella e ne segue la traiettoria (lagrangiano).

A questo punto risulta utile richiamare il concetto di derivata temporale materiale, poiché essa consente una trasformazione immediata tra le variazioni delle grandezze da una descrizione lagrangiana ad una euleriana e viceversa.

La derivata temporale materiale (detta lagrangiana) di un campo euleriano è una derivata totale rispetto al tempo che indica la variazione nel tempo del campo suddetto di una grandezza, scalare o vettoriale, mantenendo fissato un punto materiale. Tale derivata può essere pensata

come la variazione della grandezza di interesse, misurata da un osservatore che viaggia “a cavallo” della particella con una velocità di deriva $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$.

Considerando una certa proprietà scalare espressa dal campo scalare $f(\mathbf{x}, t)$, la sua derivata temporale materiale viene definita come:

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla f \quad (4.23)$$

dove:

∇f è il gradiente del campo scalare f ;

$\frac{\partial f}{\partial t}$ è la derivata parziale (detta euleriana) del campo scalare f .

4.3.2.4 Alcuni teoremi fondamentali

Di seguito vengono riportati sinteticamente due teoremi fondamentali per la determinazione delle equazioni di bilancio dei fluidi: il teorema della divergenza e il teorema del trasporto di Reynolds.

Il teorema della divergenza permette di passare da un integrale di volume V ad un integrale sulla superficie S che lo racchiude, e viceversa, ed è definito dalla seguente equazione:

$$\int_V \nabla \cdot \mathbf{F} dV = \int_S \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} dS \quad (4.24)$$

Concettualmente esprime l'uguaglianza tra la divergenza di un campo vettoriale in un volume ed il flusso del medesimo campo vettoriale attraverso la superficie del volume stesso.

Ancora più importante è il teorema del trasporto di Reynolds, formulato su di un volume $V(t)$, variabile nel tempo, delimitato da una superficie (bordo) $S(t)$ anche essa variabile nel tempo, ed esprime la variazione subita nel tempo da una generica proprietà del fluido (scalare o vettoriale) attraverso:

$$\frac{d}{dt} \int_V \psi dV = \int_V \left(\frac{d\psi}{dt} + \psi \nabla \cdot \mathbf{u} \right) dV \quad (4.25)$$

che applicando il teorema della divergenza può essere riscritta come:

$$\frac{d}{dt} \int_V \psi dV = \int_V \frac{d\psi}{dt} dV + \int_S \psi \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dS \quad (4.26)$$

4.3.2.5 Principio di conservazione della massa

Questa prima equazione di bilancio esprime la circostanza che qualunque sia la deformazione subita da un corpo o di una sua parte, la sua massa M non cambia nel tempo:

$$\frac{dM}{dt} = 0 \quad (4.27)$$

Ad una deformazione che, ad esempio, diminuisca il volume di una parte corrisponde, quindi un aumento della densità di massa e viceversa. Questa formulazione del principio di conservazione della massa è una formulazione lagrangiana, ossia centrata sul corpo visto come insieme di punti materiali.

Applichiamo ora tale principio ad una parte del corpo fluido che occupa, per effetto del moto cui è soggetta, un volume variabile nel tempo $V(t)$ e quindi possiede massa pari ad $M = \int_{V(t)} \rho(\mathbf{x}, t) dV$, con $\rho(\mathbf{x}, t)$ è la densità del fluido nella posizione \mathbf{x} e nell'istante t . La (4.27) viene quindi riscritta come segue:

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho(\mathbf{x}, t) dV = 0 \quad (4.28)$$

Utilizzando il teorema del trasporto, ponendo $\psi = \rho$, la (4.28) può essere riscritta come:

$$\int_{V(t)} \left(\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} \right) dV = 0 \quad (4.29)$$

Oppure, applicando il teorema della divergenza (4.24), trasformarsi in:

$$\int_V \frac{d\rho}{dt} dV + \int_S \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (4.30)$$

L'equazione (4.30) può essere letta anche in un altro modo, definibile euleriano: se

consideriamo V come un volume fisso ed S la superficie che lo racchiude, la variazione di massa all'interno del volume fisso eguaglia la differenza di massa dovuta ai flussi entranti ed uscenti (Figura 4.5).

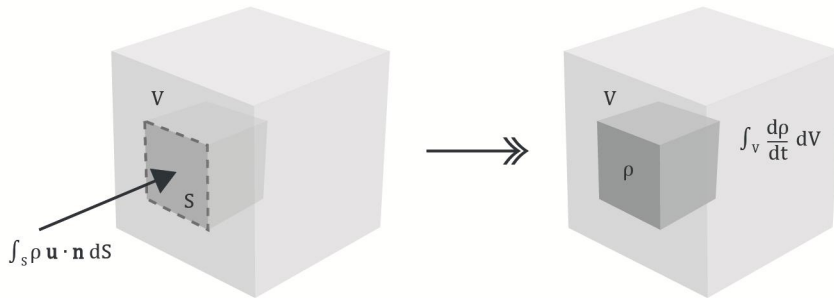


Fig. 4.5: esempio di bilancio di massa di un volume di controllo in una regione dello spazio: ad un flusso di massa entrante attraverso una superficie di bordo S (a sinistra) corrisponde un aumento della densità di massa ρ del volume di controllo (a destra).

La forma differenziale della (4.29) può essere dedotta considerando che, in virtù dell'arbitrarietà della parte del corpo ovvero del volume $V(t)$ considerato, l'integrale è identicamente nullo solo se lo è la funzione integranda, ovvero:

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (4.31)$$

4.3.2.6 Principio di conservazione della quantità di moto e del momento della quantità di moto

La meccanica Newtoniana ci fornisce una legge fondamentale, l'equazione del moto, altrimenti detta "principio di conservazione della quantità di moto", che eguaglia la forza esterna risultante agente su di un corpo alla derivata temporale della quantità di moto, definita come prodotto di massa per velocità del corpo medesimo.

$$\mathbf{F} = \frac{d}{dt} (m\mathbf{u}) = m\mathbf{a} \quad (4.32)$$

Nell'equazione originaria di Newton (4.32) il corpo di cui viene studiato il moto è un punto materiale (Figura 4.6), ossia un punto geometrico dotato di massa concentrata, mentre nel caso

di un fluido ci troviamo ad analizzare il moto di un corpo esteso, che occupa una regione finita dello spazio, privo di masse concentrate e potenzialmente capace di scambiare massa con la regione esterna attraverso la sua frontiera.



Fig. 4.x6: il punto materiale di Newton.

Queste differenze rispetto alla dinamica del punto materiale ne modificano l'equazione del moto, non dal punto di vista dei concetti fisici espressi, ma dal punto di vista della formalizzazione matematica.

Le differenze fondamentali tra l'equazione del moto di un punto materiale e l'equazione del moto di un fluido che si spande in una regione estesa, nascono soprattutto dalle differenze geometriche tra il punto materiale ed il corpo esteso. Un punto materiale non vincolato ha un moto caratterizzato da tre funzioni della variabile temporale, ossia, ad esempio, le sue tre coordinate in un riferimento cartesiano (x, y, z) espresse come funzione del tempo t .

In una regione riempita da un fluido in movimento, il valore delle grandezze che definiscono lo stato del fluido, ad esempio la pressione, la densità di massa, la velocità e la temperatura, può variare punto per punto; quindi queste grandezze sono rappresentate da funzioni non solo del tempo, ma anche delle coordinate della posizione monitorata.

$$\begin{aligned}
 \rho &= \rho(x, y, z, t) \\
 p &= p(x, y, z, t) \\
 T &= T(x, y, z, t) \\
 \mathbf{u} &= \mathbf{u}(x, y, z, t)
 \end{aligned}
 \tag{4.33}$$

Un'altra differenza fondamentale tra il punto materiale ed il corpo esteso è insita nella definizione delle forze agenti. Nel punto materiale c'è la forza esterna, applicata nel punto. In un corpo che occupa un volume delimitato da una superficie c'è abbastanza varietà per arrivare ad una classificazione delle forze agenti sul corpo, distinguendole tra forze esterne e forze interne e tra forze di massa e forze di superficie (Figura 4.7).

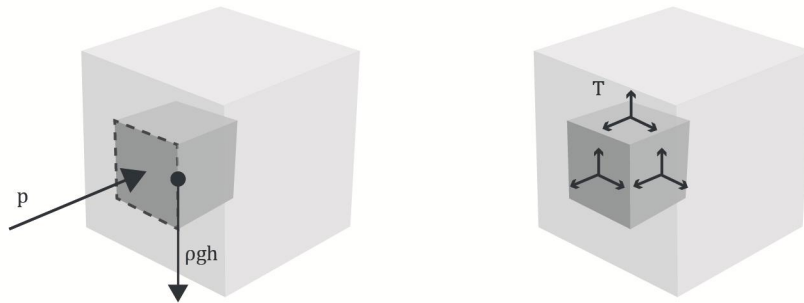


Fig. 4.7: esempio di forze esterne (a sinistra) di volume (come la forza di gravità ρgh) e di superficie (come una pressione su di un bordo di ingresso) e forze interne (a destra) di superficie (come le tensioni interne del fluido).

Le forze esterne misurano l'interazione tra il corpo in esame ed altri corpi che non sono oggetto della nostra analisi. Queste forze possono agire a distanza, come ad esempio la forza gravitazionale, oppure per contatto tramite la frontiera del corpo in esame.

Le forze che agiscono a distanza sono proporzionali alla massa del corpo medesimo, e quindi, per il tramite della densità di massa, sono proporzionali al volume.

Le forze superficiali che agiscono sulla frontiera sono proporzionali alla misura della superficie su cui agiscono. Le forze interne sono interazioni tra due parti distinte del corpo che occupa lo spazio confinato. Queste interazioni avvengono per contatto tra superfici che si immaginano generate all'interno del corpo con un taglio "virtuale". Queste forze interne di natura superficiale si chiamano tensioni di Cauchy e nei testi classici della meccanica dei corpi continui si dimostra che la tensione in un punto e su di una superficie individuata da un vettore \mathbf{n} ad essa perpendicolare è un vettore \mathbf{t} proporzionale ad \mathbf{n} tramite un tensore doppio \mathbf{T} , detto tensore delle tensioni:

$$\mathbf{t} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} \quad (4.34)$$

Entrambi i vettori \mathbf{t} ed \mathbf{n} della (4.34) ed il tensore doppio \mathbf{T} sono funzioni di due argomenti (x, t) , ossia posizione nello spazio e tempo.

Un'altra differenza tra il punto materiale ed il corpo esteso è che proprio l'estensione del corpo consente alle forze agenti sul medesimo differenti punti di applicazione, e quindi consente la definizione del momento di una forza rispetto ad un punto dato. Questa grandezza interviene in

una seconda equazione di conservazione, che non esiste nella dinamica del punto materiale, e che è l'equazione di conservazione del momento della quantità di moto. Questa equazione nella statica del corpo rigido si traduce nell'equazione di bilancio dei momenti.

L'applicazione di questo secondo principio nel contesto in esame ha come conseguenza la simmetria del tensore delle tensioni.

Se si fissa una terna di riferimento, il tensore delle tensioni viene rappresentato da una matrice, detta matrice delle tensioni. La matrice delle tensioni è una matrice quadrata 3×3 simmetrica, ogni cui colonna rappresenta la forza interna, nelle sue tre componenti, agente su di uno dei tre piani coordinati passanti per il punto in esame. La matrice delle tensioni si può rappresentare graficamente sulle facce di una regione cubica di volume infinitesimo costruito intorno al punto in esame, con le facce parallele ai piani coordinati, ossia perpendicolari agli assi coordinati (Figura 4.8).

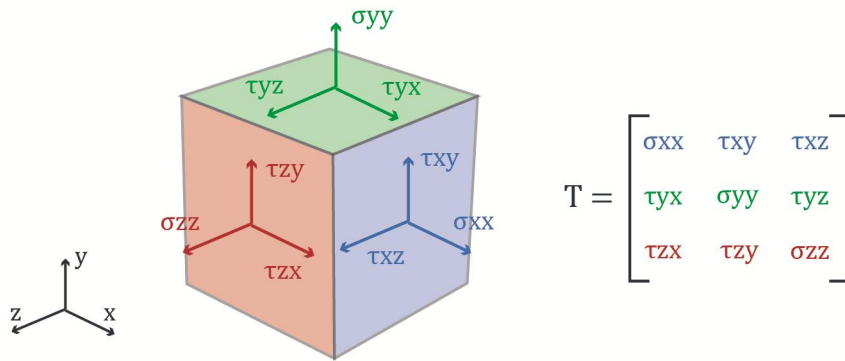


Fig. 4.8: rappresentazione grafica della matrice delle tensioni T .

Gli elementi della matrice che stanno sulla diagonale principale rappresentano le tensioni perpendicolari o normali alle facce ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$), mentre fuori diagonale troviamo le tensioni agenti di taglio sulle facce suddette ($\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{zy}$). La media aritmetica delle tensioni perpendicolari alle facce è detta pressione nel fluido e viene espressa come:

$$p\mathbf{I} = \frac{(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})}{3} \mathbf{I} \quad (4.35)$$

dove:

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ è la matrice identità.}$$

Ciò che si ottiene sottraendo dal tensore delle tensioni il contributo della pressione (4.35), ha

comunque importanza nella meccanica dei fluidi, perché ha una relazione con le forze interne di natura viscosa, che in un certo senso si oppongono allo scorrimento relativo dei filetti fluidi e la cui presenza attenua eventuali turbolenze nel moto del fluido. Questa parte del

$$\mathbf{T}_\mu = \mathbf{T} - p\mathbf{I} \quad (4.36)$$

Analizzata la natura delle forze agenti sul fluido, isolando una sotto regione dell'intero spazio confinato è possibile mettere in evidenza sia le forze interne (la tensione) agenti sulla parte, sia le forze esterne (in questo caso la forza peso).

Dal momento che da un punto di vista dimensionale questi due tipi di forze hanno dimensione fisica diversa, essendo la forza peso proporzionale al volume del corpo o della parte in esame, mentre la tensione una forza agente sulla superficie che racchiude il volume medesimo, la forza risultante agente su di una parte del fluido all'istante t sarà somma di due contributi, l'uno integrato sul volume e l'altro sulla superficie che delimita tale volume. Nell'equazione di conservazione della quantità di moto, la risultante delle forze agenti su di un corpo o su di una sua parte è eguagliata alla derivata temporale della quantità di moto del corpo o della parte.

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho \mathbf{u} dV = \int_{V(t)} \mathbf{F}_V dV + \int_{S(t)} \mathbf{t} dS \quad (4.37)$$

La (4.37) esprime il punto di vista lagrangiano del principio di conservazione suddetto. Il punto di vista euleriano si concentra invece su di una regione fissa dello spazio e sulla sua superficie. In tal caso, la quantità di moto complessiva sarà legata alla velocità della massa all'interno della regione, ma anche la quantità di moto della massa che entra o che esce dalla regione attraverso la superficie che delimita la regione medesima. Lo scambio di massa attraverso la superficie equivale quindi ad uno scambio di quantità di moto, in particolare ad un guadagno se la massa è in entrata, o ad una diminuzione nel caso di massa in uscita.

Anche in questo caso, avremo due integrali, uno di volume, per la variazione temporale della quantità di moto all'interno della regione V , l'altro di superficie per valutare la quantità di moto scambiata attraverso la frontiera della medesima:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \mathbf{u} dV + \int_S (\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{u} dS \quad (4.38)$$

Il principio di conservazione della quantità di moto in formulazione lagrangiana assume la seguente espressione:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \mathbf{u} dV + \int_S (\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{u} dS = \int_V \mathbf{F}_v dV + \int_S \mathbf{t} dS \quad (4.39)$$

Per passare dalla formulazione integrale (4.39) alla sua formulazione differenziale bisogna effettuare alcuni passaggi matematici:

- la trasformazione degli integrali di superficie in integrali di volume, tramite il teorema della divergenza;
- l'applicazione del teorema di localizzazione, che dalla nullità di un integrale su di un dominio generico deduce la nullità della funzione integranda;
- la definizione di un'equazione di legame costitutivo tra la parte delle tensioni legate alle forze viscosse ed il gradiente della velocità, tramite il coefficiente di viscosità cinematica μ ;
- la definizione delle forze proporzionali al volume come forze puramente gravitazionali $\mathbf{F}_v = \rho \mathbf{g}$;

Premesso questo, l'equazione (4.39) si trasforma nella seguente equazione differenziale alle derivate parziali:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot \left[-p \mathbf{I} + \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right] + \rho \mathbf{g} \quad (4.40)$$

Nell'equazione (4.40) la variazione temporale della quantità di moto tiene conto del fatto che la quantità di moto complessiva di una regione infinitesima dello spazio è legata non solo alla velocità della massa all'interno di suddetta regione $\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}$, ma anche alla quantità di moto della massa che entra o che esce da questa attraverso la superficie che la delimita $\rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}$.

Al secondo membro della (4.40), nel termine di divergenza del tensore delle tensioni data da $\nabla \cdot \left[-p \mathbf{I} + \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right]$, la parte legata alla pressione, ossia la parte sferica di tale tensore, rimane espressa in termini della variabile statica (la pressione) mentre la parte deviatorica viene formulata in termini della velocità del fluido.

4.3.2.7 Principio di conservazione dell'energia

Assumiamo fin dall'inizio un approccio euleriano. Il principio di conservazione dell'energia

nella regione V in esame mette in conto che tale regione è un sistema aperto, ossia ha scambi con l'esterno. In tal caso, la variazione dell'energia interna eguaglia i flussi energetici entranti e/o uscenti a cui si somma l'eventuale produzione di energia interna, fornita dalla trasformazione in calore di altre forme di energia (meccanica, elettrica, metabolica etc).

In forma adattata al problema che noi vogliamo trattare, ossia di convezione naturale, l'equazione di conservazione dell'energia può essere scritta nella sua forma più semplice, ossia trascurando i contributi di produzione interna, al pari delle differenze di energia potenziale e cinetica della masse entrante ed uscenti, in relazione alla dimensione infinitesima della sotto regione.

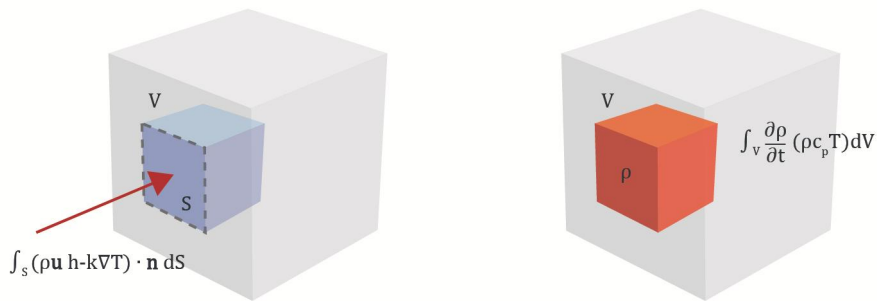


Fig. 4.9: esempio di flussi termici entranti (a sinistra) attraverso una superficie del volume di controllo ed accumulo di energia termica (a destra) nel volume di controllo.

Per quanto riguarda l'energia interna U , questa è espressa come un'energia per unità di massa, e quindi l'energia interna della massa contenuta in una sotto regione si esprime come integrale di volume per mezzo della densità di massa (Figura 4.9). Pertanto la variazione temporale dell'energia interna assume la seguente espressione:

$$\frac{dU}{dt} = \int_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho U) dV = \int_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) dV \quad (4.41)$$

Nella valutazione dei flussi entranti ed uscenti, in letteratura si usa introdurre il vettore flusso termico convettivo specifico (per unità di superficie), che è somma dei due vettori flusso entalpico convettivo e flusso termico conduttivo, il primo legato alle portate entranti o uscenti, il secondo a scambi di natura puramente conduttiva attraverso la superficie di frontiera. Entrambi i contributi sono espressi come densità superficiali e quindi il flusso termico scambiato attraverso l'intera frontiera sarà una quantità definite da un integrale sulla superficie:

$$- \int_S (\rho \mathbf{u} h - k \nabla T) \cdot \mathbf{n} dS \quad (4.42)$$

Eguagliando i contributi definiti nelle equazioni (4.41) e (4.42), ossia applicando il principio di conservazione, si ottiene un'equazione di bilancio scritta in termini integrali:

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) dV + \int_S (\rho \mathbf{u} h - k \nabla T) \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (4.43)$$

A questo punto, come fatto già nelle due equazioni precedenti, applicando il teorema della divergenza per trasformare un'integrale superficiale in un integrale di volume ed il teorema di localizzazione, l'equazione integrale si trasforma in un'equazione differenziale così definita:

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (4.44)$$

Nell'equazione (4.44) sono distinguibili, in forma differenziale, i tre differenti contributi, ossia:

- la variazione dell'energia interna $\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t}$, legata al calore specifico a volume costante c_v del fluido;
- il contributo convettivo $\rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T$, legato al calore specifico a pressione costante c_p ;
- il contributo conduttivo $\nabla \cdot (k \nabla T)$, legato alla costante di conducibilità k .

Qualora il fluido sia ritenuto incomprimibile allora si può porre $c_v = c_p$.

4.3.2 Considerazioni sul sistema di equazioni

Le tre equazioni differenziali che corrispondono ai tre principi sopra enunciati, e che qui di seguito richiamiamo,

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot \left[-p\mathbf{I} + \mu(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} \right] + \rho\mathbf{g}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}) = 0 \quad (4.45)$$

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k\nabla T)$$

sono accoppiate, ossia vanno messe a sistema e risolte contemporaneamente ai fini della determinazione dei campi incogniti, che sono il campo di velocità, che è un campo vettoriale, ed i tre campi scalari che sono la pressione, la temperatura e la densità.

Affinchè il sistema sia risolvibile vanno indicati i valori numerici di alcuni parametri che intervengono nelle equazioni, come ad esempio la viscosità cinematica μ , i calori specifici a volume e pressione costante (c_v e c_p), la conducibilità termica k del fluido.

Vanno altresì aggiunte del condizioni al bordo del dominio di integrazione, sia sulle grandezze meccaniche, come pressione e velocità, sia sulle grandezze puramente termiche, come temperatura e flusso termico, con la accortezza di non creare condizioni al bordo di natura contrastante, ossia porre sulla medesima porzione di frontiera non si possono imporre condizioni sulla velocità e sulla pressione, oppure sulla temperatura e sul flusso termico. Quando il problema è stazionario il sistema di equazioni andrebbe semplificato eliminando l'esplicita dipendenza dal tempo; in caso di problema non stazionario, eventuali condizioni iniziali su tutto il dominio sulla velocità e sulla temperatura vanno aggiunte.

E' importante ora effettuare un piccolo computo, allo scopo di giustificare l'aggiunta di un'ulteriore equazione senza la quale il sistema non può essere risolto.

Poiché un campo vettoriale corrisponde a due campi scalari in 2D ed a tre campi scalari in 3D, complessivamente le incognite del problema corrispondono a 6 campi scalari in 3D o 5 campi scalari in 2D. A fronte di questi campi scalari incogniti, non c'è un numero di equazioni sufficiente, perché l'equazione del moto equivale a due o tre equazioni scalari a seconda dei casi 2D/3D e le altre due equazioni sono due equazioni scalari. Manca dunque un'equazione scalare, che rappresenta il legame tra densità, pressione e temperatura del fluido che nei termini più generali assume la forma seguente:

$$\rho = \hat{\rho}(p, T) \quad (4.46)$$

4.3.3 Forze di galleggiamento

Nella maggioranza dei casi di interesse ingegneristico, il sistema costituito dalle equazioni (4.45)-(4.46) è notevolmente semplificabile poiché la variabilità dei valori della densità e dei vari coefficienti ad essa legati è dovuta principalmente alle variazioni di temperatura.

Per variazioni di temperatura non superiori a $\Delta T = 10[\text{K}]$ è applicabile l'approssimazione di Boussinesq [342], che riformula l'equazione di Navier-Stokes generica per fluidi comprimibili in caso di flusso dovuto a forze di galleggiamento (*bouyant flow*). Tale approssimazione assume che le variazioni di densità non hanno effetti sul campo del flusso ad eccezione delle forze di galleggiamento.

Per questo la densità viene ritenuta costante $\rho = \rho_0$ ³³, ad eccezione dell'ultimo termine della (4.40) relativo alle forze di volume, che viene definito come:

$$F = \rho \mathbf{g} = (\rho_0 + \Delta\rho)\mathbf{g} \quad (4.47)$$

Poiché il vettore della gravità \mathbf{g} può essere espresso come potenziale gravitazionale Φ , la (4.47) diventa:

$$F = -\nabla(\rho_0\Phi) + \Delta\rho\mathbf{g} \quad (4.48)$$

Ciò premesso, è possibile eliminare il primo termine, esprimendo la pressione p come somma della componente idrodinamica P e di quella idrostatica $-\rho_0\Phi$ mediante la seguente equazione:

$$p = P - \rho_0\Phi \quad (4.49)$$

Il termine della pressione della (4.40) può essere riscritto, in accordo con la (4.49), come segue:

$$-\nabla p = -\nabla P + \nabla(\rho_0\Phi) \quad (4.50)$$

³³ Ne segue che la variazione del coefficiente μ , relativa a variazioni di ρ , è dello stesso ordine e quindi trascurabile (si assume dunque $\mu = \mu_0$).

Dunque, in conseguenza a tali ipotesi, è possibile scrivere la (4.40) in forma:

$$\rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho_0 (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu_0 (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + \Delta \rho \mathbf{g} \quad (4.51)$$

Viene condotta un'ulteriore semplificazione, esprimendo la variazione di densità (del termine delle forze di galleggiamento) in funzione solamente della temperatura $\rho = \hat{\rho}(T)$ ed applicando la legge di Volta Gay-Lussac data dalla (4.52):

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta(T - T_0)) \quad (4.52)$$

Considerato che per i gas ideali il coefficiente di dilatazione termica (*coefficient of thermal expansion*):

$$\beta = \frac{1}{T_0} \quad [K^{-1}] \quad (4.53)$$

L'ultimo termine della (4.51) diviene:

$$\Delta \rho \mathbf{g} = (\rho - \rho_0) \mathbf{g} = -\rho_0 \left(\frac{(T - T_0)}{T_0} \right) \mathbf{g} \quad (4.54)$$

Dunque con l'utilizzo dell'approssimazione di Boussinesq e della legge di Volta Gay-Lussac, la (4.40) può essere infine scritta come:

$$\rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho_0 (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu_0 (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] - \rho_0 \left(\frac{(T - T_0)}{T_0} \right) \mathbf{g} \quad (4.55)$$

Inoltre, poiché il fluido viene in questo modo considerato incomprimibile, l'equazione della conservazione della massa (4.31) assume la forma:

$$\rho_0 (\nabla \cdot \mathbf{u}) = 0 \quad (4.56)$$

4.3.5 Scambi radiativi

Il fenomeno dello scambio termico per irraggiamento consiste nella trasmissione di energia attraverso onde elettromagnetiche. Considerando un corpo nel ruolo di ricettore, viene indicato con G il generico flusso entrante proveniente da sorgenti esterne, come il sole o fonti di calore, altre pareti, l'aria dell'ambiente circostante (Figura 4.10).

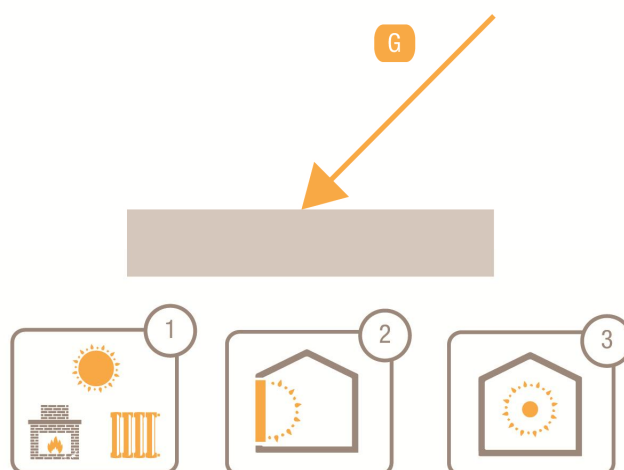


Fig. 4.10: Componenti della radiazione incidente G : sorgenti esterne (1), pareti circostanti (2), ambiente circostante (3).

Quando queste onde incontrano un corpo vengono in parte riflesse, assorbite o trasmesse dal corpo stesso (Figura 4.11). La radiazione incidente G equivale alla somma di questi tre contributi, concetto espresso dall'equazione:

$$G = \alpha G + \tau G + \rho G \quad (4.57)$$

dove:

G = radiazione incidente sul corpo;

α = fattore di assorbimento del corpo;

τ = fattore di trasmissione del corpo;

ρ = fattore di riflessione del corpo;

con $\alpha + \tau + \rho = 1$.

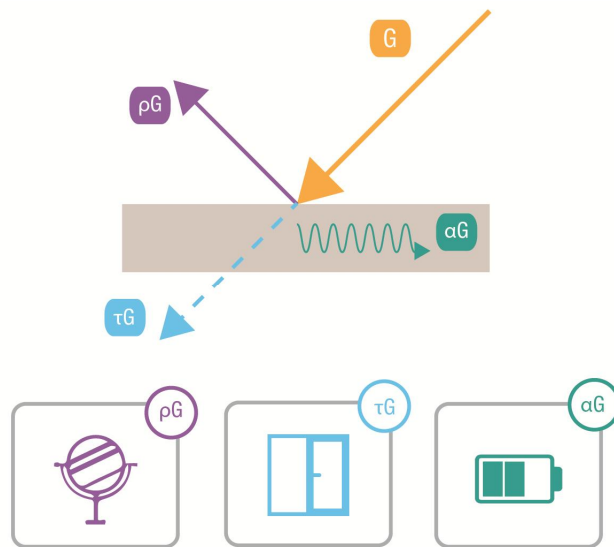


Fig. 4.11: Riflessione, trasmissione ed assorbimento della radiazione incidente.

Parallelamente, considerando il corpo nel ruolo di sorgente, viene indicato con E il flusso termico uscente per radiazione definito da:, proporzionale alla quarta potenza della temperatura del corpo stesso T e al coefficiente ε , detto emissività,

$$E = \sigma \varepsilon T^4 \quad (4.58)$$

dove:

ε = emissività del corpo;

T = temperatura del corpo;

σ = costante di Stefan-Boltzmann.

Risulta di fondamentale importanza il coefficiente ε poiché il suo valore, stabilito in base al materiale di finitura superficiale del corpo considerato ($0 \leq \varepsilon \leq 1$), determina l'ordine di grandezza dello scambio termico per irraggiamento di una data superficie.

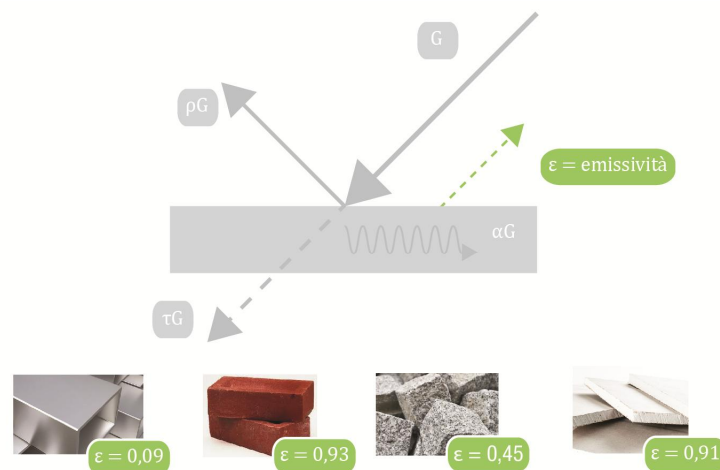


Fig. 4.12: Valori di emissività per alcuni materiali di finitura superficiale.

In generale, il flusso termico per irraggiamento di una superficie viene calcolato mediante la seguente equazione:

$$q_r = q_{in} - q_{out} = G - J \quad (4.59)$$

in cui G è il generico flusso entrante e J è il flusso uscente dalla superficie considerata, chiamato anche radiosità.

Volendo analizzare il fenomeno di irraggiamento all'interno di un ambiente si possono utilizzare differenti approcci (Figura 4.13):

- 1) si considera l'aria come un corpo totalmente opaco ($\alpha = 1, \tau = 0, \rho = 0$) alla radiazione proveniente dalle superfici, assorbendola per intero;
- 2) si considera l'aria come un corpo totalmente trasparente ($\alpha = 0, \tau = 1, \rho = 0$) alla radiazione proveniente dalle superfici, lo scambio avviene dunque solo tra superfici;

In entrambi i casi vengono condotte sulle superfici le ipotesi di corpo opaco ($\tau = 0$) e della legge di Kirchoff ($\alpha = \epsilon$). Poiché come detto in precedenza $\alpha + \tau + \rho = 1$, segue che $\rho = 1 - \epsilon$.

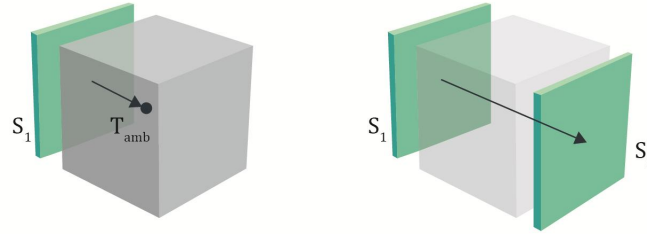


Fig. 4.13: Due approcci: 1) l'aria considerata come mezzo opaco (a sinistra); 2) l'aria considerata come mezzo trasparente (a destra).

Nel caso 1) l'aria viene considerata un corpo totalmente opaco ($\alpha = \varepsilon_{amb} = 1$) e il flusso termico viene così calcolato:

$$q_r = G - J = \sigma\varepsilon(T_{amb}^4 - T^4) \quad (4.60)$$

dove:

$$G = \sigma\varepsilon_{amb}T_{amb}^4 = \sigma T_{amb}^4 \text{ con } \varepsilon_{amb} = 1;$$

$$J = (E + \rho G) = (\varepsilon\sigma T^4 + (1 - \varepsilon)G) \text{ dato } \rho = 1 - \varepsilon \text{ (legge di Kirchoff);}$$

$$G - J = G - (\varepsilon\sigma T^4 + G - \varepsilon G) = -\varepsilon\sigma T^4 + \varepsilon G = -\varepsilon\sigma T^4 + \varepsilon\sigma T_{amb}^4 \text{ da cui si ricava la (4.60).}$$

Nel caso 2) l'aria viene considerata un corpo totalmente trasparente ($\alpha = \varepsilon_{amb} = 0$) e il flusso termico viene determinato dallo scambio radiativo che avviene tra le sole superfici delle pareti. Il flusso termico viene così calcolato:

$$q_r = G - J = \varepsilon(G_m(J) - \sigma T_k^4) \quad (4.61)$$

dove:

$G = G_m(J)$ è il flusso entrante nella parete k-esima dovuto al mutuo irraggiamento tra superfici, ovvero ai flussi uscenti dalle altre pareti (per radiosità) ed incidenti sulla parete considerata;

$$J = (E_k + \rho G) = (\varepsilon\sigma T_k^4 + (1 - \varepsilon)G_m(J)) \text{ dato } \rho = 1 - \varepsilon \text{ (legge di Kirchoff);}$$

$$G - J = G_m(J) - (\varepsilon\sigma T_k^4 + G_m(J) - \varepsilon G_m(J)) = -\varepsilon\sigma T_k^4 + \varepsilon G_m(J) \text{ da cui si ricava la (4.61).}$$

In questo caso particolare, essendoci interazione tra più pareti, la radiazione incidente $G = G_m(J)$ sulla parete k-esima è espressa dal seguente sistema, costituito da n-equazioni ed n-incognite pari al numero delle n-pareti che interagiscono con la parete k-esima stessa:

$$G_m(J) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n F_{k,j} J_j \quad (4.62)$$

dove:

$F_{k,j}$ = fattori di vista (che tengono conto della configurazione geometrica e della reciproca disposizione tra le pareti considerate);

J_j = radiosità delle n-pareti interagenti con la parete k-esima.

I due approcci sopra esposti non sono esclusivi. Questo vale nel particolare caso in cui si voglia analizzare lo scambio che avviene, ad esempio, tra più superfici le quali però non delimitano completamente l'ambiente considerato. Nella fattispecie, si può provvedere a una combinazione dei due modelli attraverso la somma dei due contributi. Inoltre viene introdotto un fattore di vista dell'ambiente F_{amb} , il cui valore (compreso tra 0 e 1) è pari alla frazione di campo che non è coperta da altre superfici (Figura 4.14).

Il flusso radiativo complessivo viene dato dalla seguente equazione:

$$q_r = G - J = \varepsilon(G_m(J) + F_{amb}\sigma T_{amb}^4) - \varepsilon\sigma T_k^4 \quad (4.63)$$

dove:

$$G = G_m(J) + F_{amb}\sigma T_{amb}^4$$

$$J = (E_k + \rho G) = (\varepsilon\sigma T_k^4 + (1 - \varepsilon)(G_m(J) + F_{amb}\sigma T_{amb}^4))$$

$G - J = (G_m(J) + F_{amb}\sigma T_{amb}^4) - (\varepsilon\sigma T_k^4 + (1 - \varepsilon)(G_m(J) + F_{amb}\sigma T_{amb}^4))$ dalla quale si ricava la (4.63).

In condizioni normali e alla temperatura ambiente, l'aria viene considerata un mezzo totalmente trasparente alla radiazione, detto anche mezzo "non partecipante".

Detto questo, risulta evidente che lo scambio radiativo non influenza in modo diretto la temperatura dell'aria e di conseguenza non ne altera in modo diretto il moto; questo aspetto risulta di cruciale importanza, poiché permette di analizzare in maniera separata lo scambio conduttivo-convettivo e quello radiativo.

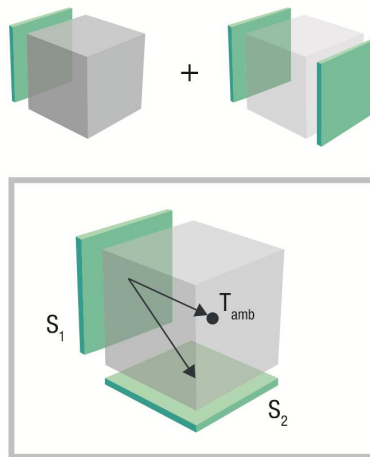


Fig. 4.14: Combinazione dei due modelli di radiazione (aria come mezzo opaco-trasparente) nel caso di ambiente non completamente circoscritto da superfici.

Tuttavia, anche se non coinvolge in modo diretto l'aria, lo scambio termico radiativo che avviene tra le pareti determina un flusso termico entrante o uscente dalle loro superfici che va, di volta in volta, ad alterare le condizioni al contorno dell'analisi termo-fluidodinamica.

A tal proposito risulta necessario un processo di risoluzione iterativa al fine di accoppiare i due fenomeni.

4.3.6 Considerazioni finali sui modelli CFD

I modelli CFD forniscono una visione dettagliata dei fenomeni di termo-fluidodinamica e risultano i più accurati nella simulazione di tali fenomeni su intervalli di tempo ridotti. Per questo motivo possono essere definiti *fine models*.

Tuttavia, alla grande accuratezza delle informazioni ottenute si contrappongono degli svantaggi:

- l'incertezza delle condizioni al contorno, poiché questi modelli devono presupporre una serie di condizioni al contorno provenienti da misurazioni, prove sperimentali, dati provenienti da un software multi-zona oppure, in assenza di questi, dati ottenuti da studi parametrici che forniscano una casistica del fenomeno.
- i risultati richiedono un tempo significativo, sia riguardo all'ingente costo computazionale per risolvere le equazioni, sia riguardo la creazione del modello e l'interpretazione dei risultati.

4.4 Aspetti riguardanti la modellazione numerica

4.4.1 Software CFD utilizzato nella tesi

Il software utilizzato in questa tesi è *Comsol Multiphysics* (release 4.4): è una piattaforma che include tutti i passaggi del lavoro di simulazione, dalla definizione geometrica dei domini a cui si applicano le equazioni fisiche, fino al post processing dei risultati ottenuti. Nella descrizione dei domini sono forniti strumenti di modellazione geometrica tramite oggetti solidi, superfici, curve ed operazioni booleane (unione, sottrazione etc): geometrie parametrizzate sono anche includibili e l'importazione di diversi formati di file CAD è possibile. L'associazione tra gli oggetti geometrici e le equazioni fisiche su di esse agenti è automatica, nel senso che una modifica della geometria di un oggetto induce automaticamente tutte le modifiche correlate al modello matematico associato.

Una caratteristica molto interessante specifica del modellatore geometrico di Comsol, e non presente in altri software, è la possibilità di effettuare operazioni di “geometria virtuale” che consentono semplificazioni geometriche “intelligenti”, mirate ad ottenere soluzioni migliori ai fini della discretizzazione. Il software consente cioè di identificare ed eliminare alcune caratteristiche geometriche difficili da discretizzare e che produrrebbero problemi di robustezza algoritmica e magari concentrate in regioni “trascurabili” per la fisica del fenomeno e che quindi possono essere ignorate.

Dal punto di vista dei fenomeni descrivibili, Comsol ha una serie di modelli predefiniti per la modellazione di un'amplissima gamma di fenomeni fisici, inclusi molti accoppiamenti multifisici comuni, come nel nostro caso l'accoppiamento tra la termica e la fluidodinamica, o la termo fluidodinamica e l'irraggiamento tra superfici. In aggiunta, il software consiglia in automatico le tipologie di studio disponibili, la discretizzazione numerica più appropriata, fornendo anche possibilità di discretizzazioni adattive, le sequenze del solutore e le impostazioni di visualizzazione e post-processing: tuttavia, e questo è uno degli ulteriori vantaggi di questo software, consente l'accessibilità alle equazioni fisiche del modello, consentendone una maggiore comprensione ai fini didattici ed una personalizzazione, ove necessario.

4.4.2 Studio preliminare su di un caso semplificato



Fig. 4.15: Fotografia del soggiorno della casa Med in Italy.³⁴

Prima di affrontare il più complesso caso di un edificio storico, è stato svolto un esercizio su di un caso studio semplificato: l'oggetto studiato è la casa che ha partecipato al *Solar Decathlon Europe 2012* costruita dal team *Med in Italy*³⁵ [343].

Sono state condotte delle simulazioni CFD, mediante il software *Comsol Multiphysics* (release 4.4) con lo scopo di stimare il contributo della ventilazione notturna combinata alle masse termiche interne, in termini di riduzione del fabbisogno di raffrescamento estivo.

Tale caso è da considerarsi semplificato in quanto è condotto in un intervallo di tempo limitato di 7 ore, corrispondenti ad una tipica notte notturna, su di uno spazio di dimensioni modeste, il soggiorno della casa (Fig. 4.15), e sotto determinate condizioni (adiabaticità della maggior parte delle pareti, assenza di irraggiamento) di seguito descritte.

Inoltre, le superfici delimitanti il volume 3D corrispondente al soggiorno (Fig. 4.16), sono state presupposte completamente adiabatiche (flussi termici nulli), in virtù dell'elevato isolamento termico caratterizzante l'edificio. Gli unici elementi modellati nel loro spessore sono le due masse termiche interne (parete ovest e nord), modellate come due parallelepipedi di spessore 8 cm, rappresentanti file di tubi di alluminio riempiti con sabbia e giustapposti alle pareti interne,

³⁴ Immagini e grafici tratti da *Numerical modelling of structural cooling in Mediterranean climate* [343].

³⁵ Università degli studi di Roma Tre, Università di Roma "La Sapienza", la Libera Università di Bolzano, Fraunhofer Italia e Accademia di costume e moda di Roma.

come mostrato in Figura 4.15.

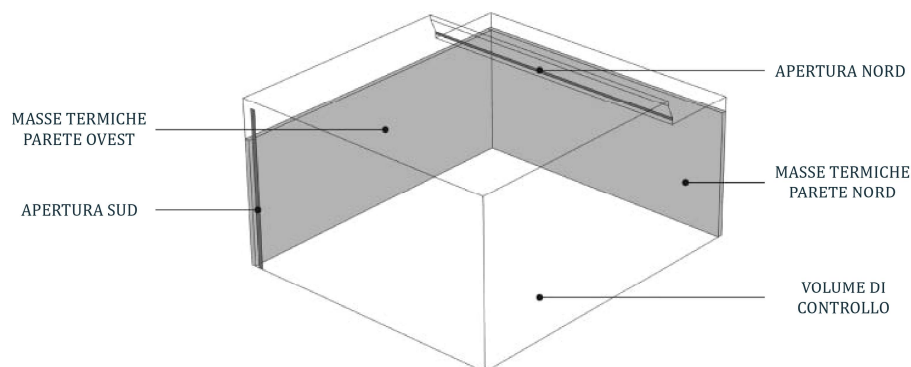


Fig. 4.16: Geometria 3D del soggiorno modellata in Comsol.

La modellazione è stata effettuata mediante il modulo *Comsol Non-isothermal flow* implementando l'approssimazione di *Boussinesq*, come descritto nel par. 4.3.3.

Il dominio è stato discretizzato utilizzando una *mesh* di 102644 elementi e 120280 gradi di libertà; lo studio selezionato è di tipo *time-dependent* con un *time step* di 60 sec. Il solutore utilizzato è di tipo *nonlinear fully coupled direct solver*.

Le condizioni iniziali sono:

- temperatura iniziale assegnata all'intero dominio di 303,15 K (30°C);
- temperatura esterna uguale a 293,15 K (20°C);
- pressione idrostatica assegnata all'intero dominio fluido.

Le condizioni al bordo sono:

- isolamento termico per tutte le superfici delimitanti il dominio;
- condizioni *no-slip* sulle superfici al bordo del dominio fluido;
- sovrappressione idrodinamica nulla sulle aperture, rispettivamente *Inlet: Pressure, No Viscous Stress* sull'apertura sud e *Outlet: Pressure, No Viscous Stress* sull'apertura nord, al fine di apprezzare i flussi dati dalle sole forze di galleggiamento, in assenza di vento.

In Figura 4.17 vengono presentati i campi di temperatura dell'aria e delle masse termiche dopo 1 minuto, 10 minuti, 1 ora e 7 ore di ventilazione notturna. Nella colonna sinistra della figura vengono presentate le temperature interne considerando un piano di sezione passante per la finestra sud, la superficie del pavimento e la superficie della massa termica a nord; nella colonna di destra le due superfici interne delle masse termiche.

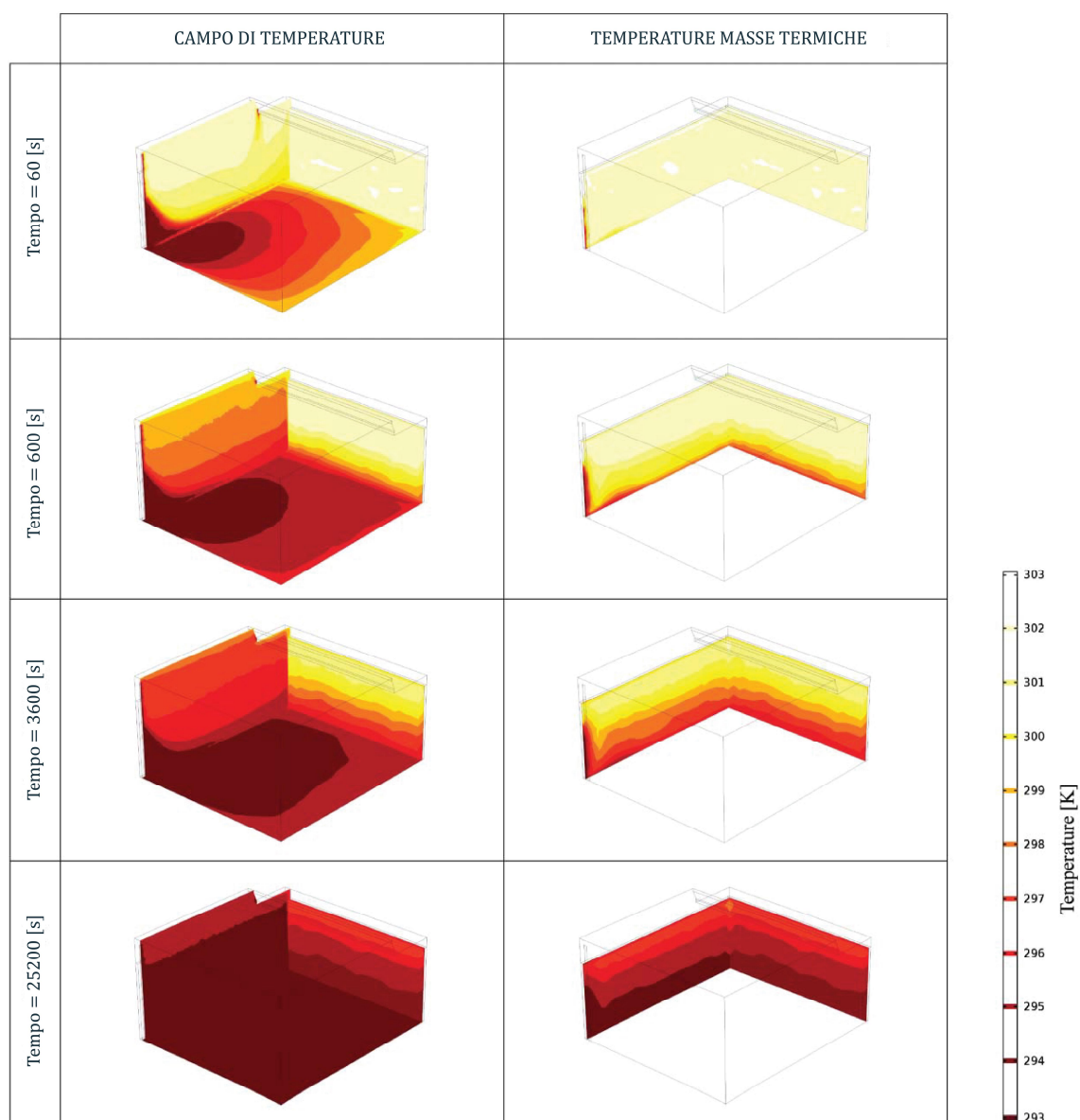


Fig. 4.17: Campo di temperature interne e delle masse termiche in 4 istanti di tempo durante il ciclo di ventilazione notturna.

In Figura 4.18 viene mostrato l'andamento delle temperature della parete nord e dell'aria. La figura indica che, ovviamente, il raffreddamento dell'aria è più rapido di quello della massa; inoltre, la massima differenza di temperatura tra aria e massa è di 3,95 K dopo 480 s, dovuta allo svuotamento iniziale dell'aria calda, mentre la differenza decresce nel tempo.

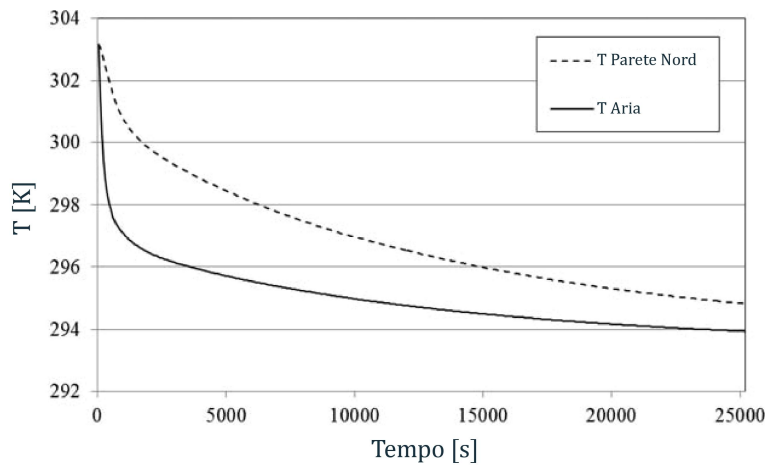


Fig. 4.18: Temperature medie delle masse termiche durante il ciclo di ventilazione notturna.

In relazione alle temperature medie delle superfici interne delle masse durante l'intero ciclo di ventilazione notturna, graficamente mostrate sulla colonna destra della Fig. 4.17, si ha che:

- dopo sette ore di ventilazione notturna le temperature medie delle masse sono, rispettivamente, 294,97 K per la parete ovest e 294,82 K per la parete nord, con una percentuale di raffrescamento di circa 183%;
- la variazione di temperatura delle due masse è qualitativamente e quantitativamente simile: è presente una leggera differenza relazionata alla prossimità della parete ovest all'apertura a sud; tuttavia questa differenza non è numericamente significativa, come mostrato dai flussi termici delle masse presentati in Figura 4.19.

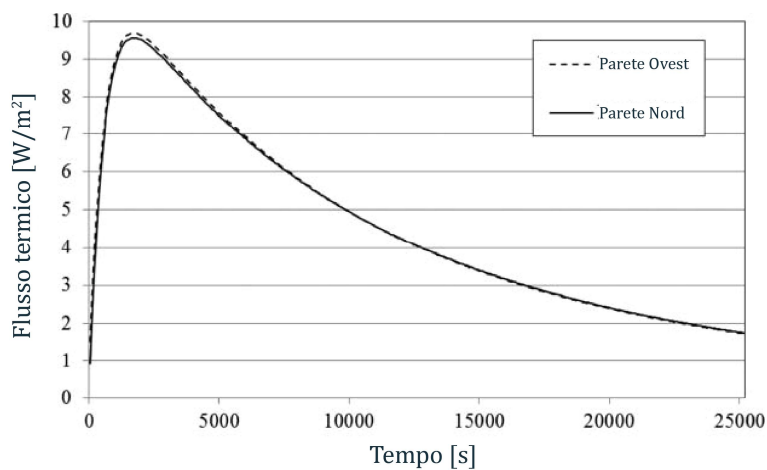


Fig. 4.19: Temperature medie delle masse termiche durante il ciclo di ventilazione notturna.

Inoltre, un altro obiettivo dello studio è stato quello di determinare lo spessore di masse termiche effettivamente coinvolto nel ciclo di raffrescamento notturno in termini di energia termica dissipata. Tale dato è stato ottenuto integrando i flussi termici della Fig. 4.19 nel tempo e determinando quindi l'effettiva energia dissipata Q_{eff} .

L'energia effettivamente dissipata è stata successivamente comparata con quella potenzialmente dissipabile THC , per un $\Delta T = 10 K$, calcolata grossolanamente mediante l'equazione [327]:

$$Q_s = THC = \rho c_p V \Delta T \text{ [MJ]} \quad (4.63)$$

dove $Q_s = THC$ corrisponde all'energia termica massima che può essere accumulata o dissipata dalla massa termica definita da $\rho c_p V$ per una differenza di temperatura pari a ΔT .

L'equazione 4.63 è ottenuta integrando nel tempo l'equazione 2.1 (pag. 68).

Comparando Q_{eff} e THC è possibile definire la percentuale di massa e lo spessore effettivamente coinvolto nella dissipazione, come mostrato in Tabella 4.2.

L'energia termica effettivamente dissipata è un dato rilevante, in quanto esprime la riduzione in termini di raffrescamento ai fini del mantenimento del comfort termico nelle ore diurne il giorno successivo alla ventilazione naturale notturna; vale a dire che questo valore può essere inteso come la riduzione della richiesta di raffrescamento dell'impianto HVAC.

Parete	Q_{eff} [MJ]	THC [MJ]	% _{eff} [%]	s_{tot} [cm]	s_{eff} [cm]
Ovest	1,37	5,54	30,16	8,00	2,41
Nord	1,19	4,11	29,02	8,00	2,32

Tab. 4.2: Integrazione dei flussi termici, percentuale di energia effettivamente dissipata e spessore realmente coinvolto nella dissipazione.

Infine, un'ulteriore considerazione è stata condotta sulla determinazione del coefficiente di scambio termico h_c definito dall'equazione 2.1, con l'obiettivo di una fruttuosa integrazione e confronto tra il modello CFD e i modelli multi-zona. Poiché l'attenzione è focalizzata sugli scambi convettivi e sull'interazione solido-fluido, la simulazione CFD è stata condotta trascurando gli scambi radiativi.³⁶

³⁶ Poiché i tubi sono in alluminio, una finitura con emissività molto bassa ($e=0,095$), l'ordine di grandezza del flusso termico radiativo è stato stimato mediante una ulteriore simulazione, a valle dei risultati della

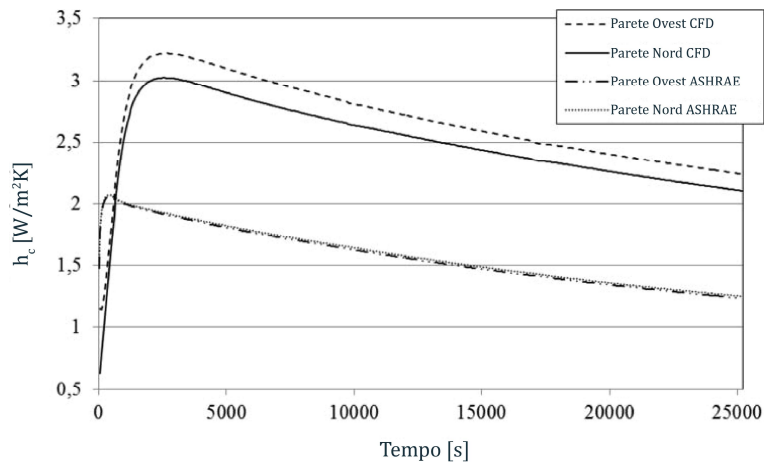


Fig. 4.20: Coefficienti h_c calcolati per le due pareti secondo i risultati CFD ed il metodo ASHRAE.

La Figura 4.20 mette a confronto i coefficienti h_c delle due pareti, calcolati gli uni attraverso i risultati della CFD (esplicitando l'equazione 2.1 ed utilizzando i flussi termici ottenuti mediante la CFD), gli altri mediante il metodo approssimativo utilizzato generalmente dai modelli multi-zona calcolato, a parità di ΔT , mediante l'equazione [344]:

$$h_c = 1,31 |\Delta T|^{\frac{1}{3}} \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{K}] \quad (4.64)$$

L'errore medio nella determinazione del coefficiente tra i due metodi è di circa il 40% per la parete ovest e del 38% per la parete nord.

CFD, e risulta essere al massimo dello 0,15% rispetto al flusso termico conduttivo. Si è ritenuto quindi possibile, in questo particolare studio, trascurare gli scambi convettivi. Bisogna sottolineare che in casi di distribuzione delle temperature non simmetriche o in presenza di elevati valori di emissività il fenomeno non può essere trascurato.

5. Un caso di studio

5.1 Premessa

L'obiettivo del testo che segue è quello di applicare la modellazione CFD a un caso di studio del patrimonio italiano, al fine di stimare gli effetti di alcune strategie di raffrescamento passivo da ventilazione naturale, sia sul comfort interno che sul risparmio energetico. Il caso di studio presentato non ha una valenza progettuale ma è un esempio applicativo ben definito ma di natura accademica, selezionato per la conoscenza del luogo e la facilità con cui si è potuto reperire il materiale documentale [345].

Il caso di studio selezionato è il Padiglione 2B dell'ex Mattatoio di Testaccio a Roma (Figura 5.1), attualmente adibito a locale della facoltà di Architettura dell'Università di Roma Tre. Tale edificio rappresenta un caso di studio particolare per alcune caratteristiche:

- fa parte del patrimonio industriale italiano di fine '800;
- la sua destinazione d'uso originaria è molto diversa dalla destinazione d'uso attuale;
- ha subito un intervento di restauro profondo;
- è stato dotato di impianti di condizionamento HVAC.

In aggiunta, il Padiglione risulta un interessante esempio applicativo perché:

- possiede alcune caratteristiche costruttive ricorrenti negli edifici del patrimonio italiano (murature perimetrali massive, grandi altezze interne, finestre su entrambi i lati);
- è geometricamente regolare e simmetrico, favorendo una più semplice discretizzazione spaziale degli elementi;
- non è utilizzato di notte, poiché adibito ad edificio per l'istruzione, dunque non presenta controindicazioni per la ventilazione notturna estiva;
- è dotato di impianti HVAC, dunque si presta all'utilizzo di strategie ibride di raffrescamento passivo (ad es. ventilazione notturna e condizionamento diurno).

Inoltre, essendo sede della facoltà di Architettura, l'edificio è facilmente raggiungibile ed è stato già in passato oggetto di studio di indagini storiche, grazie alle quali è reperibile una documentazione sugli aspetti costruttivi.

5.1 Descrizione dell'edificio

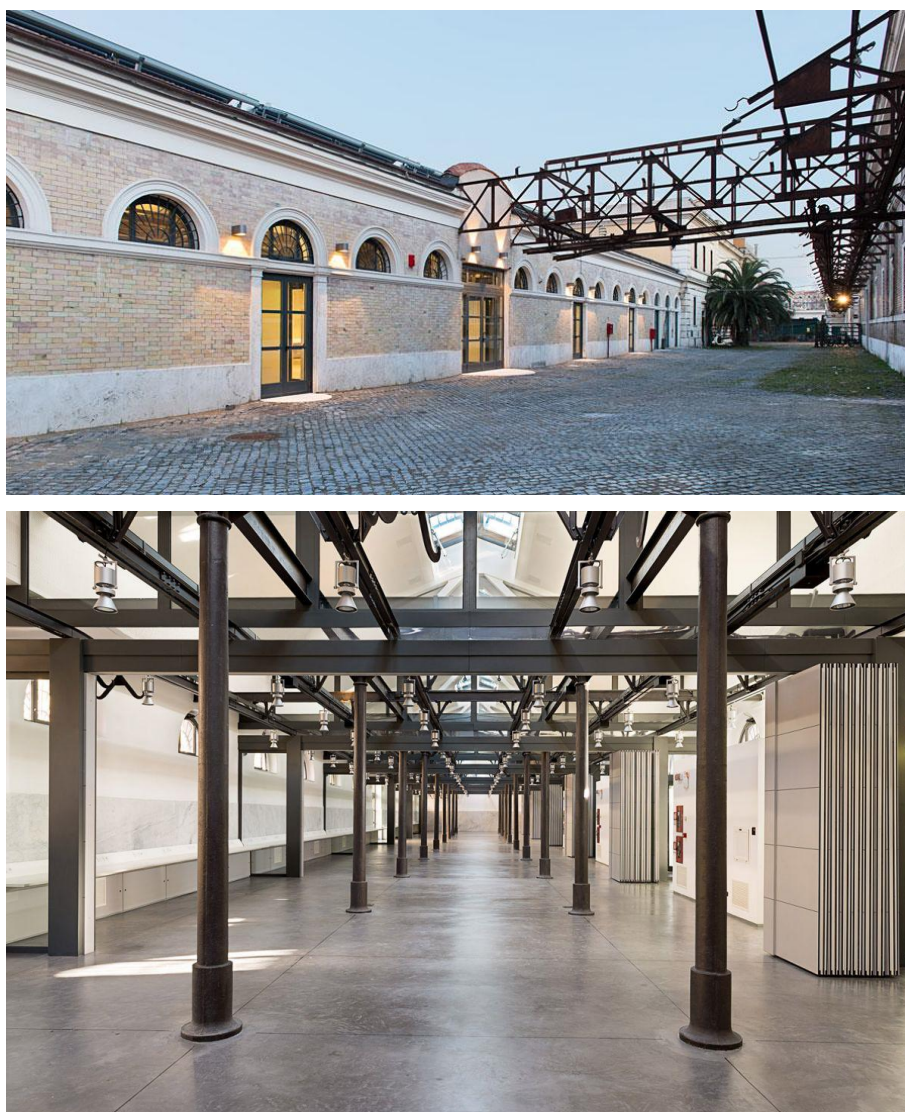


Fig. 5.1: Fotografie del Padiglione 2B dell'ex Mattatoio di Testaccio ad oggi.³⁷

L'ex Mattatoio di Testaccio è stato costruito dal Comune di Roma negli anni 1888-1891, con progetto e direzione dell'architetto Gioacchino Ersoch [346].

In particolare, il Padiglione 2B era originariamente una stalla di sosta del bestiame domito: una grande sala ad un piano, coperta da un tetto a falde e divisa in sette stalle contigue da sei muri di spina trasversali, con finestre a lunette lungo le pareti perimetrali.

³⁷ Immagini e grafici tratti da *A numerical prediction of the passive cooling effects on thermal comfort for a historical building in Rome* [345] e da www.insulainrete.it/.

Un primo intervento risale al 1932, quando l'edificio è stato adibito alla vendita delle carni. Questa nuova funzione ha portato allo svuotamento totale del padiglione, demolendo i divisori interni, sostituiti da coppie di capriate in calcestruzzo armato, e inserendo lucernari in copertura.

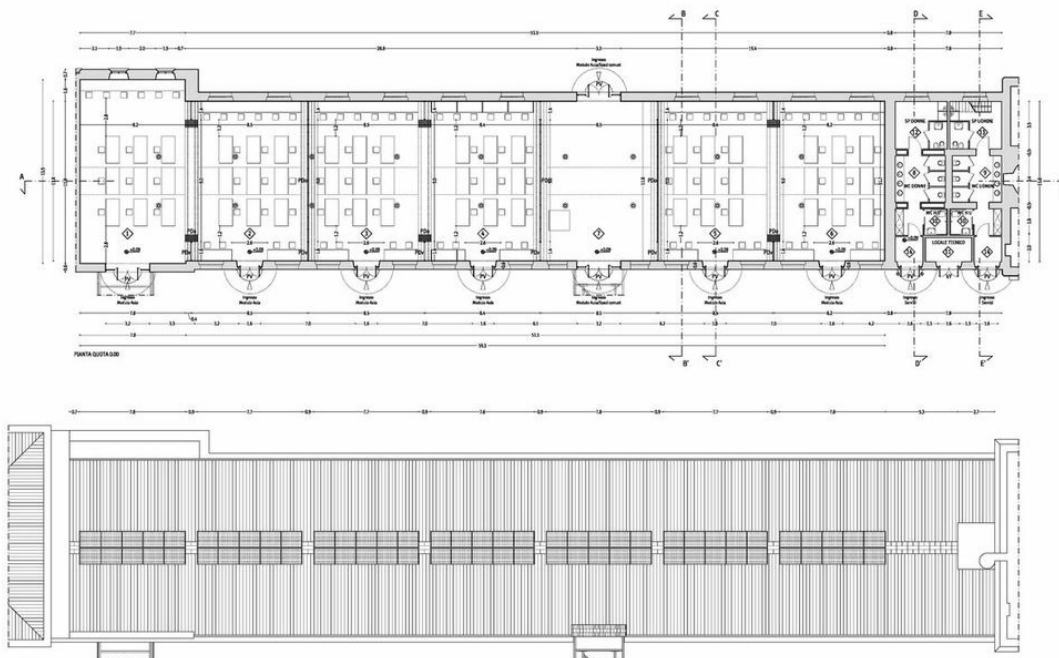


Fig. 5.2: Attuale assetto del Padiglione 2B dell'ex-Mattatoio dopo gli interventi di restauro del 2013.

Ad oggi il padiglione 2B, inaugurato nel 2013, è stato trasformato in un ambiente flessibile per lo svolgimento dei seminari progettuali, di attività straordinarie (workshops, esposizioni ecc.) ed aule studio della Facoltà di Architettura. Quest'ultimo intervento di restauro, ad opera dello studio Insula ingegneria ed architettura, ha visto il rifacimento della copertura e dei lucernari, del solaio di terra e l'inserimento di partizioni mobili che ripropongono l'originaria divisione degli ambienti (Fig. 5.2).

“Il fabbricato delle stalle è ad un solo piano coperto a tetto a due pioventi, formato con pannelle e tegole marsigliesi sorrette da travi a T e doppio T incastrati sui muri laterali d'ogni ambiente. La decorazione esterna è semplice e solida; i muri di perimetro sono in ossatura di mattoni con rivestimento a cortina stuccata; lo zoccolo è in lastre di travertino; gli stipiti delle porte e le soglie pure in travertino. Le stalle ricevono luce nei due lati longitudinali da ampie lunette praticate al disopra dell'architrave delle porte, decorate semplicemente da una mostra e da una fascia all'importa; una cornice termina il fabbricato coperta con lastre di ardesia.”

Con queste parole Gioacchino Ersoch illustra il progetto del Mattatoio nella raccolta di disegni e

descrizioni da lui pubblicata nel 1891. [346]

In relazione proprio alla caratterizzazione delle murature perimetrali, l'edificio risulta essere di particolare interesse poiché l'intervento di restauro non ha alterato le caratteristiche di queste strutture, che ad oggi si presentano pressoché nel loro stato originario. In particolare, per quanto riguarda le murature, da uno studio condotto dal dipartimento di Progettazione e Scienze dell'Architettura dell'università degli studi di Roma Tre [347], si evince che *“la maggior parte delle murature dei padiglioni è costituita in mattoni pieni, con cortina di mattoni pressati e stuccati. [...] I muri esterni hanno uno spessore complessivo pari a circa 75-78 cm e sono probabilmente realizzati a cinque teste.”* Le pareti perimetrali hanno dunque mantenuto la loro struttura originaria in mattoni pieni, con spessore complessivo pari a 75-78 cm (probabilmente realizzata a cinque teste), con finitura esterna in cortina stuccata ed interna ad intonaco.

La nuova copertura è costituita da un solaio in travetti d'acciaio che sorreggono pianelle in laterizio e massetto di argilla espansa, con isolante esterno e finitura con tegole in laterizio; i lucernari sono costituiti da infissi in alluminio con doppio vetro e camera d'aria interna e presentano brisoleil metallici orientabili, medesima stratigrafia senza schermature per le lunette laterali; il solaio di terra è costruito su casseri areati, isolante e presenta un massetto in calcestruzzo. Il restauro ha inoltre dotato l'edificio di un sistema impiantistico HVAC, inserendo una controsoffittatura che accoglie i canali dell'impianto ad aria, ed installando pannelli radianti a pavimento.

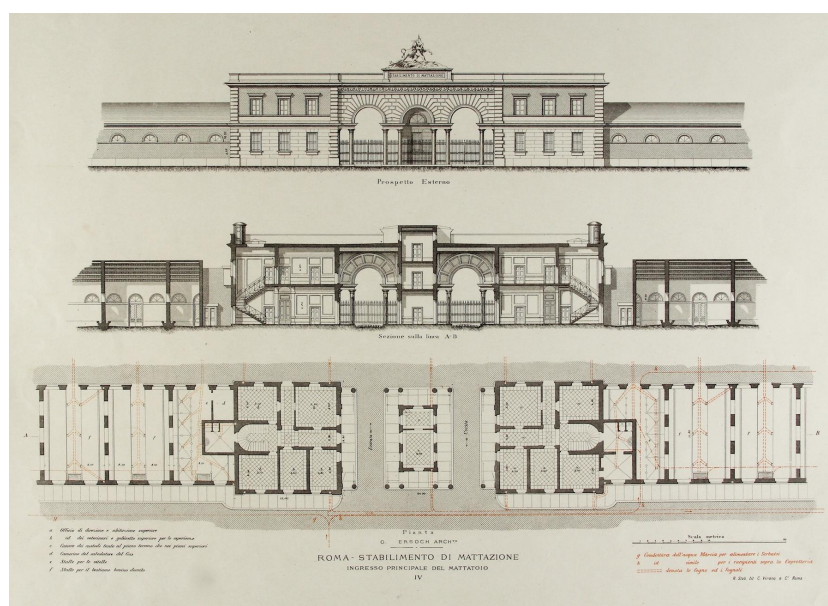


Fig. 5.3: “Stabilimento di Mattazione: Ingresso principale del Mattatoio” nei disegni di G. Ersoch [346].

5.2 Descrizione dei modelli

5.2.1 Semplificazione 2D e proprietà termo-fisiche

Il padiglione 2B è una sala lunga 60 metri, larga 14 metri e con altezza sottocornice di 5 metri e altezza massima interna di 9 metri in prossimità dei lucernari, come illustrato in Figura 5.4. La superficie complessiva è di 840 m² e il volume di 4800 m³.

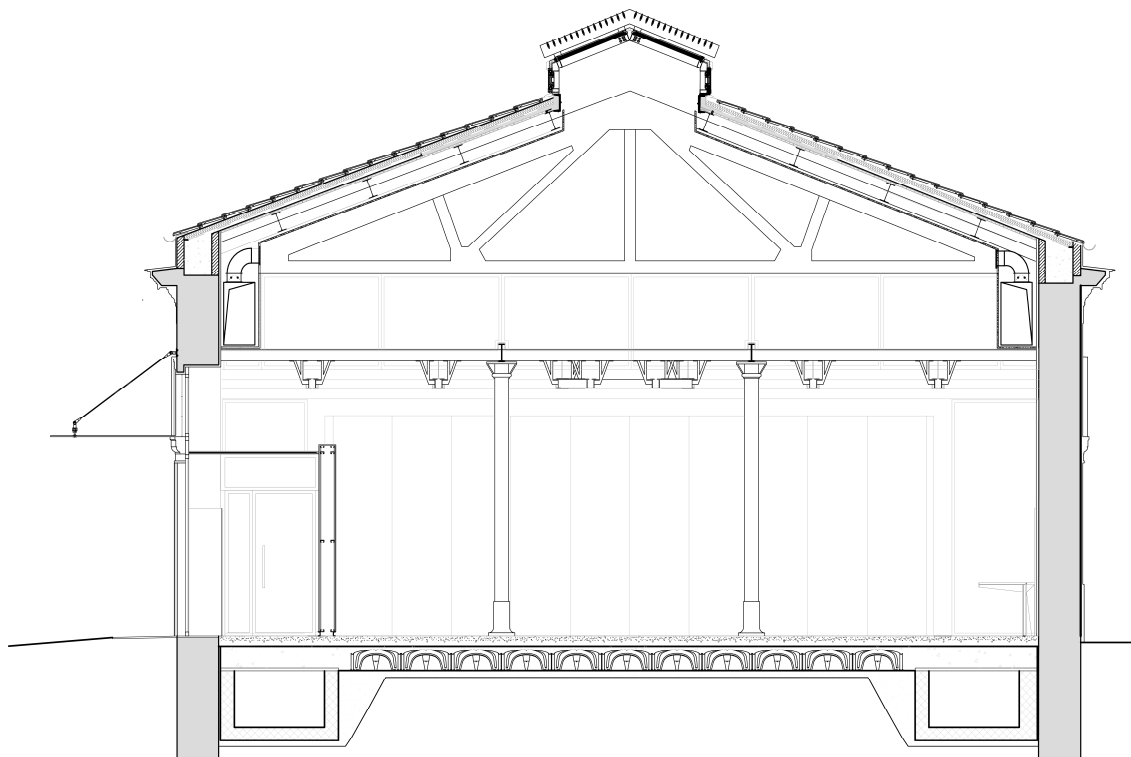


Fig. 5.4: Sezione trasversale di dettagli del Padiglione 2B.

L'edificio presenta una sezione longitudinale pressoché costante; la periodicità delle aperture lungo entrambi i lati lunghi del Padiglione ha premesso l'approssimazione del problema 3D in un problema bidimensionale, che può essere rappresentativo di ciò che accade nello spazio tra gli interassi di due finestre successive. Al fine di analizzare la ventilazione naturale, le finestre a lunetta sono state approssimate come finestre a nastro di area equivalente, corrispondenti ad un'apertura pari al 55% dell'area finestrata. D'altra parte, poiché è presente su tutta la lunghezza del padiglione, il lucernario è stato modellato fedelmente attraverso due finestre apribili (Figura 5.5 e 5.6), la cui area di apertura corrisponde al 58% dell'area finestrata.

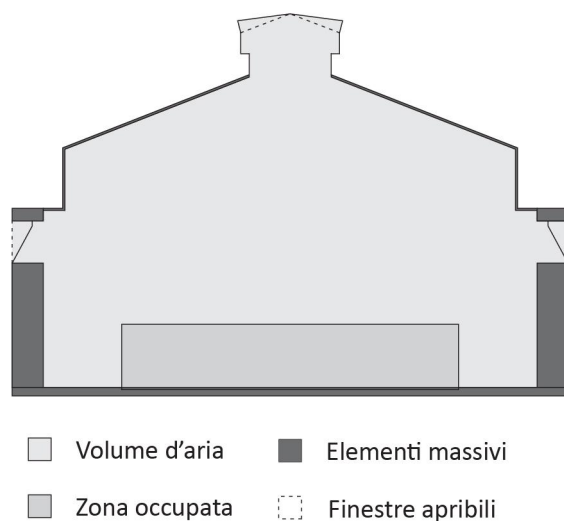


Fig. 5.5: Geometria CAD 2D rappresentante la sezione trasversale del Padiglione 2B.

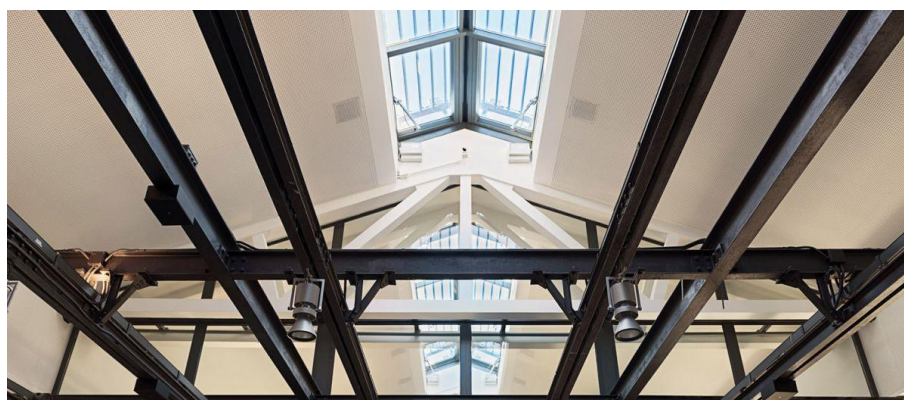


Fig. 5.6: Dettaglio del lucernario apribile e delle lamelle frangisole orientabili.

La Tabella 5.1 riporta le caratteristiche termo-fisiche relative ai differenti materiali da costruzione³⁸. Ai fini di ottimizzare il modello e ridurre i tempi di simulazione si è scelto di modellare nel loro intero spessore³⁹ solamente gli elementi massivi costituenti le pareti verticali perimetrali, il solaio di terra e il pannello interno del controsoffitto in cartongesso, le cui

³⁸ I riportati in Tabella 5.1 valori sono desunti dal progetto esecutivo dell'intervento di recupero. Da questi sono ricavati i valori di trasmittanza. In particolare, per il controsoffitto è stato utilizzato un coefficiente correttivo per considerare la camera d'aria ventilata al suo interno.

³⁹ Quindi, in 2D, mediante superfici.

temperature sono importanti in termini di scambi radiativi tra superfici.

Per quanto riguarda le superfici trasparenti e il solaio di copertura si è scelto di non modellare tali elementi nel loro intero spessore, trascurandone l'accumulo termico, ma di modellarli solamente come linee rappresentanti il loro strato superficiale interno, in accordo con le condizioni al bordo che verranno di seguito descritte.

Descrizione	Spessore [cm]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [J/kg·K]	Conducibilità [W/m·K]	Emissività [0-1]
Mattoni - pareti verticali	75	1800	1512	0,81	0,9
Calcestruzzo alleggerito	20	1200	1056	0,37	0,9
Cartongesso	5	900	981	0,21	0,9
Solaio di copertura	20	-	-	0,069	-
Finestre con vetrocamera	1,4	-	-	0,035	-

Tab. 5.1: Proprietà termo-fisiche dei materiali e stratigrafie dell'edificio.

5.2.2 Equazioni di campo

La simulazione numerica è stata condotta attraverso un modello di calcolo accoppiato, in cui vengono simulati i meccanismi di conduzione (nei solidi), di convezione (solido-fluido) e radiazione. Ai fini del calcolo numerico è stato impiegato il software agli elementi finiti Comsol Multiphysics, release 4.4 [348], utilizzando il modulo CFD “Non isothermal flow” con flusso laminare⁴⁰, con l’ipotesi dell’approssimazione di Boussinesq largamente descritta nel precedente paragrafo 4.3.3.

Nel modulo “Non isothermal flow” viene risolto il sistema di equazioni differenziali descritto nel par. 4.3 (i tre principi di conservazione della massa, della quantità di moto e momento della quantità di moto e dell’energia) di cui si riporta l’equazione (4.45):

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} &= \nabla \cdot \left[-p\mathbf{I} + \mu(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} \right] + \rho\mathbf{g} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}) &= 0 \\ \rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T &= \nabla \cdot (k\nabla T) \end{aligned} \quad (4.45)$$

Applicando l’approssimazione di Boussinesq, ponendo la densità costante $\rho = \rho_0$ e manipolando il termine delle forze di galleggiamento $\rho\mathbf{g}$, l’equazione (4.45) può essere riscritta come segue:

$$\begin{aligned} \rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho_0(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} &= \nabla \cdot \left[-p\mathbf{I} + \mu(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} \right] + \rho_0 \left(\frac{T - T_0}{T_0} \right) \mathbf{g} \\ \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \\ \rho_0 c_v \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_0 c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T &= \nabla \cdot (k\nabla T) + Q \end{aligned} \quad (5.1)$$

Tale sistema di equazioni viene risolto per l’intero campo fluido, individuato nella Figura 5.7.

⁴⁰ Scelta discussa nel dettaglio nel seguente paragrafo.

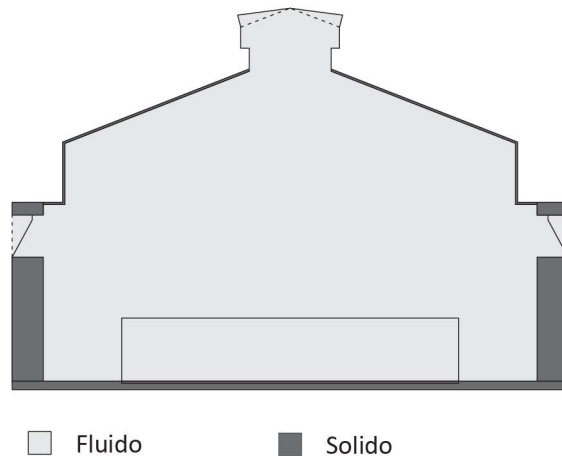


Fig. 5.7: Campo fluido e solido nel dominio considerato.

Per i solidi, l'equazione di campo che viene risolta è quella di conservazione dell'energia, che viene espressa come segue:

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (5.2)$$

Nella (5.2) il termine Q include tutte le produzioni di energia termica generate dai carichi interni ed esterni, come di seguito specificato nella determinazione delle condizioni al bordo.

Inoltre, la presenza degli scambi radiativi, sia tra superfici che con l'ambiente circostante, come spiegato nel par. 4.3.5, impone la seguente condizione sulle superfici interne degli elementi solidi:

$$-\mathbf{n} \cdot (-\hat{k} \nabla T) = \varepsilon(G - \sigma T^4) \quad (5.3)$$

Lo scambio radiativo può diventare rilevante in presenza di finiture ad elevata emissività o in caso di raffreddamento asimmetrico delle masse interne⁴¹.

⁴¹ L'Equazione (5.3) non è una condizione al bordo ma esprime il bilancio del flusso termico all'interfaccia tra solido e fluido (aria), dove \hat{k} è la differenza tra i due coefficienti di conducibilità e \mathbf{n} è il vettore normale alla superficie.

5.2.3 Flusso laminare vs turbolento

I risultati numerici sono stati ottenuti con il pacchetto *laminar flow*, ossia facendo l'ipotesi di flusso laminare, come ipotesi iniziale da vagliare prima di entrare nel mondo complesso dei modelli di turbolenza. Conviene premettere delle considerazioni [349].

Nei fenomeni di convezione naturale il moto dell'aria è determinato da forze di natura diversa, ossia dalle forze di galleggiamento indotte dalla variazione della densità dell'aria per effetto della variazione termica, e dalle forze di natura viscosa che si trasmettono nel fluido tramite la componente no-pressure della tensione interna al fluido. La prevalenza di un tipo di forze rispetto all'altra è una delle circostanze che determinano il confine tra moti laminari, in cui i filetti fluidi scorrono gli uni rispetto agli altri, e moti turbolenti, in cui il moto è predominato da vortici che rimescolano porzioni di fluido a temperatura diversa. Questo fatto diventa particolarmente importante quando si vuole misurare lo scambio termico tra un fluido ed una superficie solida a contatto, che è uno degli obiettivi di questa tesi.

Per distinguere tra i due casi (moti convettivi laminari o turbolenti) sono di aiuto alcuni parametri adimensionali. I parametri adimensionali compaiono quando le equazioni della termo fluidodinamica vengono espresse, appunto, in termini adimensionali (tramite opportune trasformazioni di variabili) con il vantaggio di determinare l'ordine di grandezza dei singoli addendi nelle equazioni in gioco. Nel caso di convezione naturale sono due i parametri adimensionali indicatori, ossia il numero di Grashof, Gr , definito come prodotto del numero di Richardson Ri per il quadrato del numero di Reynolds Re , e rappresenta l'ordine di grandezza delle forze di galleggiamento generate dalla convezione e l'ordine di grandezza delle forze viscosi, ed il numero di Prandtl, Pr , che rappresenta il rapporto tra la diffusività della quantità di moto e la diffusività termica. I due numeri sono così definiti:

$$Gr = Ri \cdot Re^2 = \frac{\beta g L (T_p - T_0)}{u_0^2} \left(\frac{\rho_0 u_0 L}{\mu} \right)^2 = \frac{\beta g L^3 (T_p - T_0)}{(\mu / \rho_0)^2} \quad (5.4)$$

$$Pr = \frac{\mu}{\rho \left(\kappa_0 / \rho c_p \right)} \quad (5.5)$$

dove:

β = coefficiente di dilatazione termica del fluido;

g = accelerazione di gravità;

L = lunghezza caratteristica del fenomeno (nel caso di scambio termico tra fluido ed una parete solida e la lunghezza non interrotta della zona su cui avviene lo scambio);

$T_p - T_0$ = squilibrio medio di temperature tra parete e fluido;

ρ_0 = densità del fluido a temperatura T_0 ;

μ = coefficiente di viscosità dinamica del fluido;

κ_0 = coefficiente di trasmissione termica del fluido a temperatura T_0 ;

c_p = capacità termica del fluido.

Il prodotto di questi due numeri, detto numero di Rayleigh Ra , individua il confine tra moto laminare e turbolento nei fenomeni di convezione naturale.

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{\rho_0 \beta g L^3 (T_p - T_0)}{\mu \left(\kappa_0 / \rho c_p \right)} \quad (5.6)$$

Quando il numero Rayleigh risulta inferiore a 10^8 il moto convettivo è da ritenersi laminare, mentre se Rayleigh risulta superiore a 10^9 il moto è da ritenersi turbolento, mentre per valori compresi tra 10^8 e 10^9 c'è una zona di transizione da investigare.

Nel nostro caso sussistono le seguenti condizioni:

Grashof	Prandtl	Rayleigh
$1,37 \cdot 10^9$	0,7156	$9,82 \cdot 10^8$

che forniscono un elevato numero di Grashof ma un numero di Prandtl minore dell'unità. Il numero di Rayleigh si trova di poco nella zona di transizione, e questo valore può spingere verso l'utilizzo (futuro) di modelli di turbolenza.

5.2.4 Condizioni al bordo

Le simulazioni considerano sia i carichi esterni che quelli interni, come spiegato di seguito.

Per quanto riguarda i carichi termici esterni, le condizioni esterne utilizzate nelle simulazioni sono state determinate mediante il file climatico della banca dati del software Autodesk Ecotect Analysis 2011. Mediante tale software è stato possibile condurre una simulazione preliminare su di un modello 3D del Padiglione 2B e dei padiglioni limitrofi, al fine di determinare l'irraggiamento medio incidente sulle facciate e sulle falde di copertura del padiglione studiato. Il modello geometrico 3D dell'intero complesso è stato analizzato mediante la definizione della sua localizzazione ed il suo orientamento con gli assi cardinali. Inoltre, la modellazione degli edifici prospicienti ha reso possibile la valutazione dell'ombreggiamento delle facciate del Padiglione durante l'intero arco dell'anno (Figura 5.8).

Da questo modello è stato possibile estrapolare i dati relativi alla radiazione solare incidente media su ogni superficie esterna delle pareti perimetrali e delle due falde di copertura, includendo l'ombreggiamento medio degli edifici circostanti sull'edificio studiato. Per quanto riguarda il lucernario illustrato in Figura 5.6, tale elemento è stato considerato costantemente in ombra, in quanto le schermature sono orientabili ed utilizzate a tal scopo.

In Tabella 5.2 vengono riportate le medie orarie di temperatura esterna e irraggiamento medio delle superfici nell'arco di una giornata estiva standard.

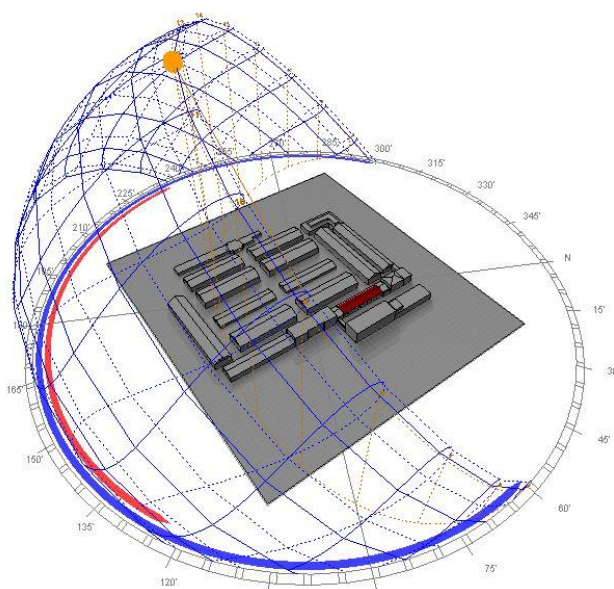


Fig. 5.8: modellazione del Padiglione 2B e del contesto del Mattatoio per determinare l'irraggiamento incidente su pareti, solai e finestre.

In questo caso, come giornata estiva standard è stato selezionato il 15 Luglio per i seguenti motivi:

- è abbastanza vicino alle medie giornaliere del periodo di studio selezionato (21 Giugno - 21 Luglio, data di chiusura estiva del padiglione);
- presenta il picco di temperatura media oraria (ore 14:00) particolarmente pronunciato;
- almeno nella metà dei giorni del periodo di riferimento (21 Giugno - 21 Luglio) le medie orarie di temperatura deviano di massimo 1-2°C dal giorno selezionato.

Ore [hh:mm]	Temperatura esterna [°C]	Radiazione solare parete NE [W/m ²]	Radiazione solare parete SW [W/m ²]	Radiazione solare falda NE [W/m ²]	Radiazione solare falda SW [W/m ²]
1:00	20,7	0	0	0	0
2:00	20,7	0	0	0	0
3:00	20,8	0	0	0	0
4:00	21,7	0	0	0	0
5:00	21,1	34	42	97	101
6:00	19,9	41	49	114	119
7:00	22	107	50	344	149
8:00	22,9	360	66	610	285
09:00	25,9	417	68	737	489
10:00	27,9	328	76	846	667
11:00	31,2	172	82	842	780
12:00	31,1	85	159	733	785
13:00	30,7	98	189	431	489
14:00	31,9	99	150	322	356
15:00	28,5	86	168	295	350
16:00	28,6	62	120	193	232
17:00	28,7	32	105	105	165
18:00	26,9	15	20	42	47
19:00	26,7	0	0	0	0
20:00	24,4	0	0	0	0
21:00	23,3	0	0	0	0
22:00	22,1	0	0	0	0
23:00	22,5	0	0	0	0
24:00	21,8	0	0	0	0

Tab. 5.2: Parametri climatici per il giorno standard estivo.

Nomenclatura

h_o	Coefficiente di scambio termico per radiazione ad onde lunghe e convezione su una superficie esterna, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
T_s	Temperatura della superficie, K
T_o	Temperatura esterna, K
α	Coefficiente di assorbimento della superficie esposta alla radiazione solare, adimensionale
E_t	Radiazione solare totale incidente sulla superficie, $W \cdot m^{-2}$
ε	Coefficiente di emissività emisferica della superficie, adimensionale
ΔR	Differenza tra la radiazione ad onde lunghe incidente sulla superficie dal cielo e dall'intorno e la radiazione emessa dal corpo nero alla temperatura dell'aria esterna, $W \cdot m^{-2}$
U_v	Trasmittanza della finestra, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
τ	Coefficiente di trasmissione luminosa della finestra, adimensionale
A	Coefficiente di assorbimento della finestra, adimensionale
N	Frazione di flusso entrante della radiazione assorbita, adimensionale
$SHGC$	Coefficiente di guadagno solare ⁴² ($SHGC = \tau - NA$), adimensionale

Al fine di tener conto degli scambi conduttivi-convettivi e l'irraggiamento solare sulle superfici opache, è stato utilizzato il concetto di temperatura aria sole T_e [350].

In una superficie esposta al sole, il flusso termico può essere espresso dall'equazione:

$$\frac{q}{A} = h_o(T_o - T_s) + \alpha E_t - \varepsilon \Delta R \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (5.4)$$

Si assume che la densità di flusso termico possa essere espressa in termini di temperatura aria-sole T_e :

$$\frac{q}{A} = h_o(T_e - T_s) \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (5.5)$$

Uguagliando la (5.4) con la (5.5), la temperatura aria-sole T_e può essere ottenuta come segue:

⁴² *Solar heat gain coefficient.*

$$T_e = T_o + \frac{\alpha}{h_o} E_T - \frac{\varepsilon}{h_o} \Delta R \quad [K] \quad (5.6)$$

Utilizzando valori di bibliografia⁴³, sono state calcolate le temperature aria-sole delle pareti e delle falde nei due orientamenti (NE-SW), nel giorno tipico estivo precedentemente indicato. Tali valori sono riportati in Figura 5.9.

Attraverso il modello 3D è stato possibile condurre un ulteriore discorso sull'irraggiamento incidente. Poiché le superfici vetrate sono trasparenti alla quota di radiazione visibile, la radiazione incidente su di esse deve essere suddivisa in diverse componenti: una parte viene riflessa, una parte assorbita, mentre una parte viene trasmessa e va ad incidere direttamente sulle superfici interne del Padiglione. Mediante la definizione di alcuni coefficienti, è stato possibile dividere la radiazione solare incidente nelle tre quote (Figura 5.10).

La parte di radiazione assorbita è stata utilizzata per determinare la condizione al bordo di flusso termico applicato alla superficie interna delle finestre.

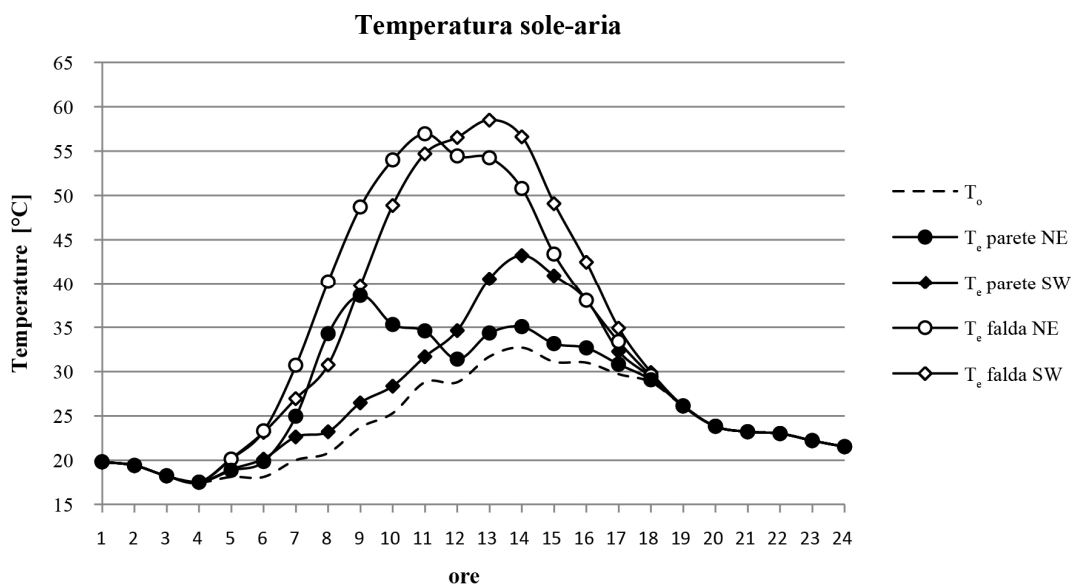


Fig. 5.9: Temperatura esterna e temperatura aria-sole calcolata per diverse superfici opache esterne del Padiglione.

⁴³ $\varepsilon = 0,63$; $\Delta R = 63 \text{ W/m}^2$; $h_o = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ per le falde inclinate, mentre per le superfici verticale è pratica comune assumere $\varepsilon\Delta R = 0$. [409]

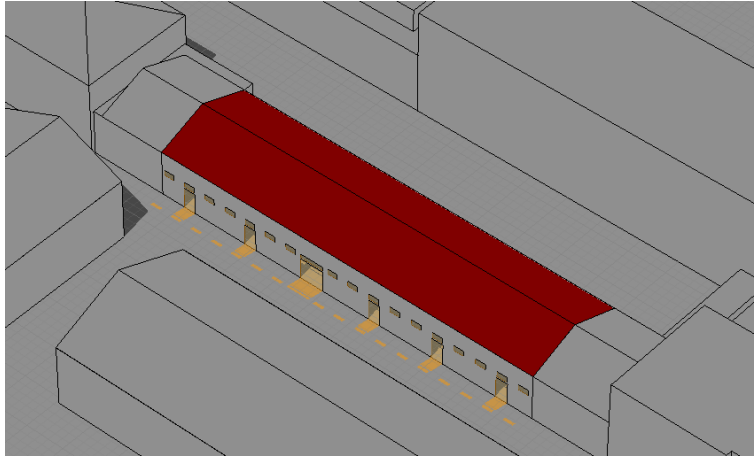


Fig. 5.10: dettaglio del modello 3D che evidenzia l'ombreggiamento e la radiazione trasmessa e riflessa dalle aperture.

Nel caso di superfici vetrate, in accordo con il ragionamento appena condotto, il flusso termico viene definito dall'equazione seguente [351]:

$$\frac{q}{A} = U_v(T_o - T_s) + (SHGC - \tau) E_T \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (5.7)$$

La (5.7) indica l'equazione al bordo sul flusso termico applicato sulla superficie interna della finestra; per questo motivo viene sottratta la quota parte trasmessa dalla finestra (τ) dal fattore di guadagno solare ($SHGC = \tau - NA$).

La parte di radiazione trasmessa è stata invece direttamente applicata come sorgente di calore (Q) alle superfici interne del Padiglione sulle quali incide, il cui valore medio orario è stato determinato mediante il modello 3D.

Per quanto riguarda i carichi termici interni, è stata modellata una sorgente di calore, rappresentante persone, laptop e luci. Tale sorgente è stata definita attraverso un'area equivalente di 8 metri di larghezza e 1,35 di altezza, corrispondente all'area di lavoro occupata dagli studenti.

Il valore complessivo del carico termico utilizzato ed è stato dedotto da valori caratteristici della letteratura [352]. In particolare, il valore è stato calcolato in riferimento al reale numero di occupanti della zona (0,625 persone/m²) e in relazione ai carichi termici interni realmente presenti.

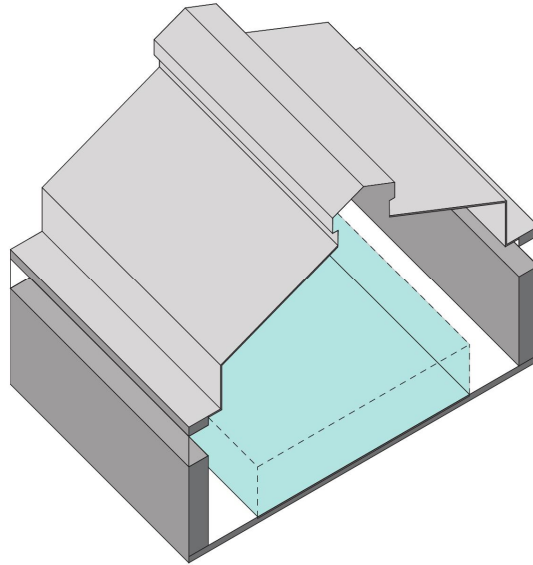


Fig. 5.11: Individuazione della zona occupata in cui si concentrano i carichi interni.

Il valore è stato calcolato su di un volume di riferimento di profondità 2m ($21,6 \text{ m}^3$), nel quale sono state condotte le seguenti ipotesi:

- 10 persone, per un totale di 1320 W;
- 8 laptops, per un totale di 240 W;
- Illuminazione artificiale corrispondente ad una superficie a terra di 28 m^2 ($3,64 \text{ W}$)⁴⁴;

Il totale dei carichi interni ammonta a 1563,64 W, che suddiviso per il volume di riferimento dà il valore di $72,39 \text{ W/m}^3$. Questo valore è stato assegnato alla zona occupata mostrata in Figura 5.11, utilizzando l'unità W/m^2 , coerentemente alla formulazione 2D.

Il profilo di occupazione considerato prevede un affollamento graduale della sala dalle 9:00 alle 11:00, orario in cui si arriva all'affollamento massimo di 100 persone, e successivo graduale svuotamento dalle 17:00 alle 19:00. Tale profilo viene espresso da una funzione rettangolo, con uno *smooth* di 2 ore iniziale e finale come mostrato in Figura 5.12.

⁴⁴ L'illuminazione è stata determinata da valori di riferimento da normativa in relazione non alla sola superficie a terra della zona occupata (in azzurro) ma all'intera superficie a terra dello spaccato riportato in Fig. 5.11.



Fig. 5.12: Funzione del profilo di occupazione governante i carichi interni.

Per le simulazioni sono state utilizzate le condizioni al bordo e iniziali presenti in Tabella 5.3. In aggiunta alle condizioni riportate in Tabella 5.3, nella simulazione condotta a finestre aperte sono state aggiunte due ulteriori condizioni al bordo, al fine di apprezzare il moto dato dalle forze di galleggiamento, in assenza di vento:

- *Inlet: Pressure, No Viscous Stress* sull'apertura delle lunette;
- *Outlet: Pressure, No Viscous Stress* sulle aperture del lucernario.

Tipo	Elemento	Descrizione	Equazione	Unità
Boundary	Pareti	Temperatura aria sole sulla superficie esterna	$T = T_e$	[K]
Boundary	Falde	Flusso termico applicato alla superficie interna dell'elemento (con temperatura aria sole esterna)	$q/A = U \cdot (T_e - T)$	[W/m ² ·K]
Boundary	Lunette	Flusso termico applicato alla superficie interna dell'elemento (con temperatura aria sole esterna)	$q/A = U_v \cdot (T_o - T_s) + SHGC \cdot E_t$	[W/m ² ·K]
Boundary	Lucernario	Flusso termico applicato alla superficie interna dell'elemento (con temperatura esterna)	$q/A = U_v \cdot (T_o - T_s)$	[W/m ² ·K]
Boundary	Pavimento	Isolamento termico applicato alla superficie esterna dell'elemento (flusso termico nullo) Fig. 5.4	$q = 0$	[W/m ² ·K]
Initial	Intero dominio	Campo di temperature alle ore 20:00 del terzo giorno ottenuto da una simulazione free-running di 3 giorni	$T_{in} = T_{field,20:00}(x, y);$	[K]

Tab. 5.3: Condizioni al bordo e condizioni iniziali.

5.2.5 Simulazioni e profili d'uso

Le simulazioni di seguito riportate sono state svolte con l'intento di determinare l'efficacia delle strategie passive relative alla ventilazione naturale, al fine di garantire il comfort termico e contribuire al risparmio energetico attraverso la riduzione dell'utilizzo dei sistemi HVAC.

In questo contesto, un'attenzione particolare è volta verso i metodi per la valutazione delle condizioni interne dati dalle teorie del comfort e dalle normative (EN 15251:2007 [332]) largamente descritte nel Capitolo 3. In accordo con questi regolamenti, il range di comfort è funzione della strategia utilizzata per garantire le condizioni climatiche interne. Infatti, se il raffrescamento è ottenuto da sistemi meccanici, il range di comfort è basato sul metodo di Fanger (calcolato attraverso gli indici PMV-PPD, *predicted mean vote - predicted percentage of dissatisfied*), descritti in dettaglio nella EN ISO 7730:2006 [330].

Quando, invece, il comfort termico viene raggiunto mediante strategie di raffrescamento passivo, gli indici vengono dati dal metodo del comfort Adattivo, che pone maggior attenzione agli aspetti culturali, sociali e comportamentali degli utenti [331].

In questo modo, dato che il range di comfort così ottenuto può essere superiore al limite massimo dei 26°C stabiliti dal metodo di Fanger, la EN 15251:2007 incentiva di fatto l'utilizzo della ventilazione naturale per il controllo delle condizioni interne.

In relazione agli standard precedentemente menzionati, le simulazioni condotte presentano tre differenti profili d'uso dell'edificio, al fine di verificare le condizioni interne in relazione all'utilizzo, o meno, di strategie di raffrescamento passivo.

I tre profili d'uso sono:

1. Senza ventilazione naturale (NoV);
2. Con sola ventilazione notturna (10hV);
3. Con ventilazione notturna e diurna (24hV).

I primi due profili includono l'utilizzo dell'impianto HVAC nel raggiungimento del comfort diurno e per questo la temperatura operativa ottenuta da queste due simulazioni può essere comparata al range di temperature di comfort ottenuto con il modello di Fanger; la terza simulazione non include l'utilizzo degli impianti HVAC e per questo motivo la temperatura operativa ottenuta può essere confrontata con il range di comfort Adattivo.

Le tre simulazioni sono state condotte con l'obiettivo, appunto, di confrontare le temperature operative del giorno standard estivo, dalle 20:00 del giorno precedente alle 20:00 del giorno monitorato.

La prima simulazione, con profilo d'uso NoV senza ventilazione, è stata condotta a finestre

chiuse e senza l'utilizzo dell'impianto di condizionamento, al fine di determinare le condizioni di temperatura operativa e predire la richiesta all'impianto HVAC per garantire il comfort termico.

La seconda simulazione, con profilo d'uso 10hV con ventilazione notturna (20:00-6:00)⁴⁵, è stata condotta con finestre aperte durante le 10 ore di ciclo di pre-raffreddamento delle masse termiche.

La terza simulazione, con profilo d'uso 24hV con ventilazione continua, è stata condotta a finestre aperte sia nel ciclo di pre-raffreddamento notturno che durante le ore diurne.

Le condizioni iniziali di temperatura per le tre computazioni è stato ottenuto mediante una simulazione preliminare di tre giorni ed esportando il campo delle temperature riferito alle ore 20:00 del terzo giorno⁴⁶.

⁴⁵ Tale scelta è motivata dal fatto che la temperatura esterna alle ore 6:00 inizia a risalire, quindi è ragionevole chiudere le finestre a quell'ora.

⁴⁶ La simulazione è stata condotta in condizioni di *free running*: a finestre chiuse, senza carichi interni, e senza utilizzo dell'impianto, assumendo come condizione iniziale di temperature un campo omogeneo uguale alla media giornaliera delle temperature. Osservando la variazione di temperature interne, è dimostrato che la durata di tre giorni è sufficiente ad estinguere gli effetti del transitorio dovuti all'equilibrio termico inizialmente imposto.

5.2.6 Algoritmi di integrazione, tolleranze numeriche e controllo dell'errore

I problemi analizzati in questa tesi, miranti a stimare la risposta inerziale di un edificio massivo a pratiche di ventilazione notturna in periodo estivo, non sono per ovvi motivi problemi stazionari, ma coinvolgono fortemente la variabile temporale. I sistemi di equazioni differenziali che definiscono il comportamento termo fluido dinamico di un edificio sono alle derivate parziali con valori al contorno e valori iniziali, e devono pertanto essere integrati nel dominio spaziale e nel dominio temporale.

Per quanto riguarda la variabile spaziale, il metodo di discretizzazione utilizzato è il metodo agli elementi finiti, su cui tutto il pacchetto *Comsol* è basato. Rimandando a dopo un commento sulla scelta di una *mesh* efficace, conviene premettere alcune considerazioni e delle informazioni di carattere generale.

Le equazioni di Navier-Stokes sono equazioni non lineari – nel primo membro esiste un termine quadratico nella velocità – ed affiancate all'equazione di conservazione dell'energia termica, in cui compare la velocità, oltre che all'equazione di conservazione della massa. Le tre equazioni insistono sullo stesso dominio fisico ed interagiscono tramite termini di accoppiamento: la velocità difatti compare nel termine avvevivo dell'equazione di conservazione dell'energia, e la temperatura compare nella variabile densità nell'equazione di conservazione della quantità di moto. Ciò premesso l'algoritmo usato dal software è basato su di un approccio "*fully coupled*" (ossia pienamente accoppiato) che risolve contemporaneamente i sistemi di equazioni algebriche derivanti dalla discretizzazione su identiche *mesh* delle tre equazioni in gioco. Ovviamente questo avviene nel contesto della soluzione di un sistema di equazioni non lineari, per quanto si diceva sopra, basato su di un algoritmo alla Newton.

Per quanto riguarda invece l'integrazione temporale l'algoritmo è sostanzialmente un metodo implicito alla Eulero.

Nel caso di studio analizzato l'intervallo temporale di simulazione è di 86400 s (24 ore), con un *time-step* di 60 s. La tolleranza relativa utilizzata per controllare l'errore di integrazione è stata scelta pari a 0,01.

Riguardo la discretizzazione spaziale, è stata condotta una analisi di sensitività sui risultati in relazione alle *mesh* utilizzate, controllando l'errore locale e globale sulle equazioni di conservazione della massa e dell'energia. Queste analisi hanno portato a due differenti discretizzazioni del dominio, rispettivamente per la configurazione a finestre aperte ed a finestre chiuse (Figura 5.13).

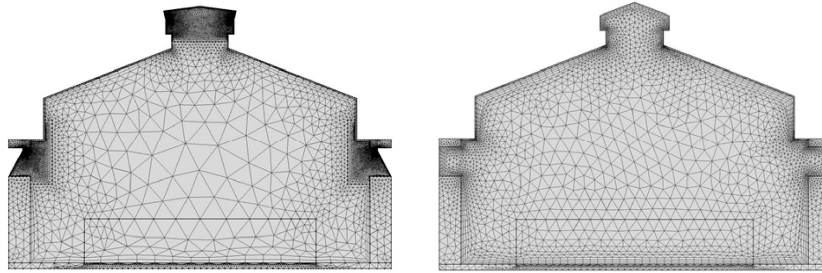


Fig. 5.13: Discretizzazione del dominio per la configurazione a finestre aperte (sinistra) ed a finestre chiuse (destra).

Nel caso della configurazione a finestre aperte, al fine di controllare l'errore indotto dai forti gradienti delle velocità in prossimità delle aperture, la *mesh* è stata divisa in sottodomini con maggior grado di dettaglio vicino alle finestre (fino a una misura degli elementi di 1 cm).

Nel caso della configurazione a finestre chiuse, non essendoci forti gradienti, la *mesh* è di medio dettaglio in tutto il dominio.

In dettaglio, la scelta dell'infittimento della *mesh* in particolari punti, nella configurazione a finestre aperte, è stata guidata da due procedimenti:

- controllo dell'errore relativo sulla conservazione della massa, considerando la differenza tra la portata in entrata ed in uscita dalle finestre in ogni intervallo temporale;
- controllo della *mesh* nelle zone critiche, soprattutto intorno agli spigoli in prossimità delle aperture, in modo da ottenere valori della divergenza della velocità il più possibile vicini allo zero.

Questi due concetti vengono di seguito supportati da alcuni dati relativi all'assetto finale della *mesh*, riportato in Fig. 5.9 lato sinistro, a finestre aperte.

In Figura 5.14 viene presentato l'errore relativo sulla conservazione della massa calcolato mediante la seguente equazione:

$$err_{rel} = \frac{\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}}{\left(\frac{\dot{m}_{in} + \dot{m}_{out}}{2}\right)} \quad (5.7)$$

Si nota come l'errore relativo sia compreso in un range di valori tra 0,003% e lo 0,007%.

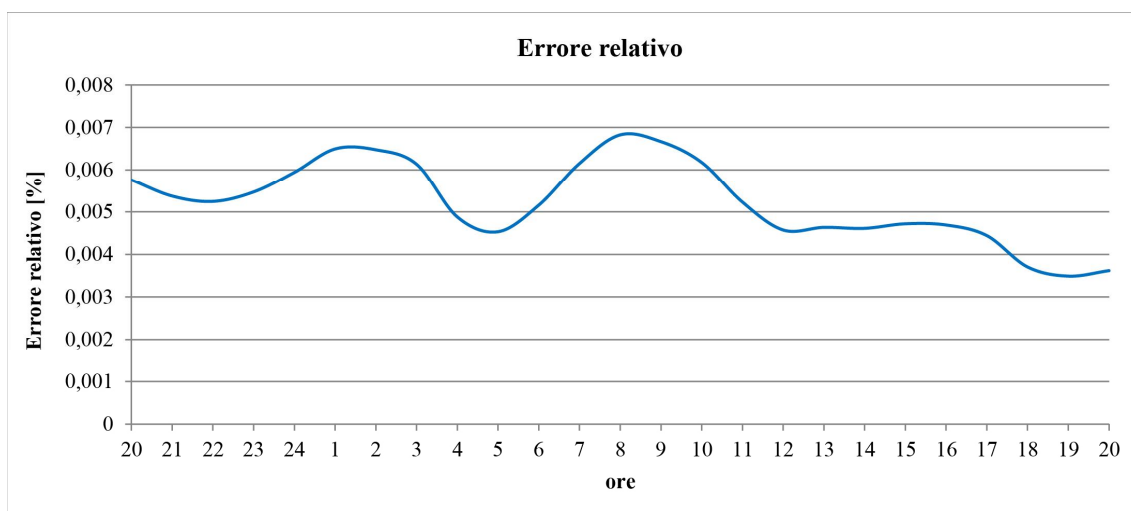


Fig. 5.14: Errore relativo sulla conservazione della massa, considerando la differenza tra la portata in entrata ed in uscita dalle finestre.

Di seguito si riporta inoltre in Figura 5.15 il campo della divergenza della velocità all'istante $t=50400$ sec. (ore 14:00). Questo istante di tempo può essere considerato quello in cui si presenta la maggior criticità, vale a dire il momento in cui si hanno i valori della divergenza più distanti dallo zero, come evidenziato nel grafico che riporta i valori medi della divergenza nelle varie aree della sezione analizzata (Fig. 5.16). Tale grafico evidenzia valori più alti nelle zone critiche vicino le aperture (A-B), fenomeno legato alla presenza di spigoli in prossimità del flusso in ingresso. Proprio per questo motivo la *mesh* è stata infittita in queste zone, poiché una *mesh* meno dettagliata evidenziava un'area di divergenza distante dallo zero ancora più estesa ed un errore relativo più elevato sulla conservazione della massa.

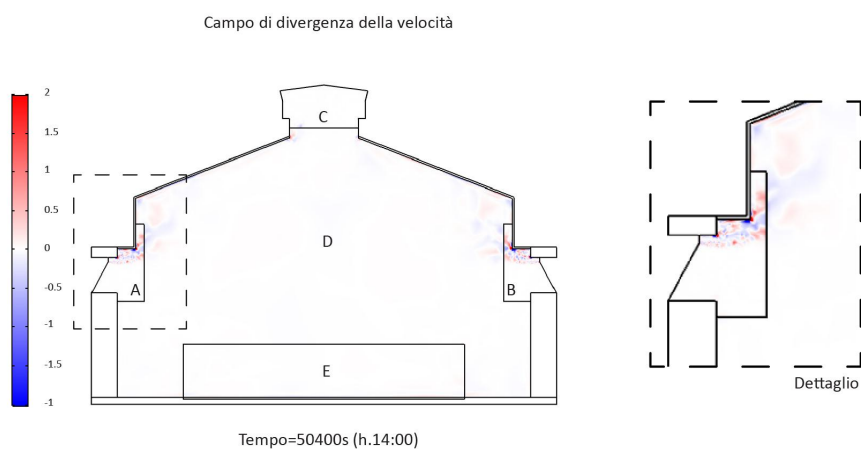


Fig. 5.15: Campo della divergenza della velocità e dettaglio in prossimità delle aperture.

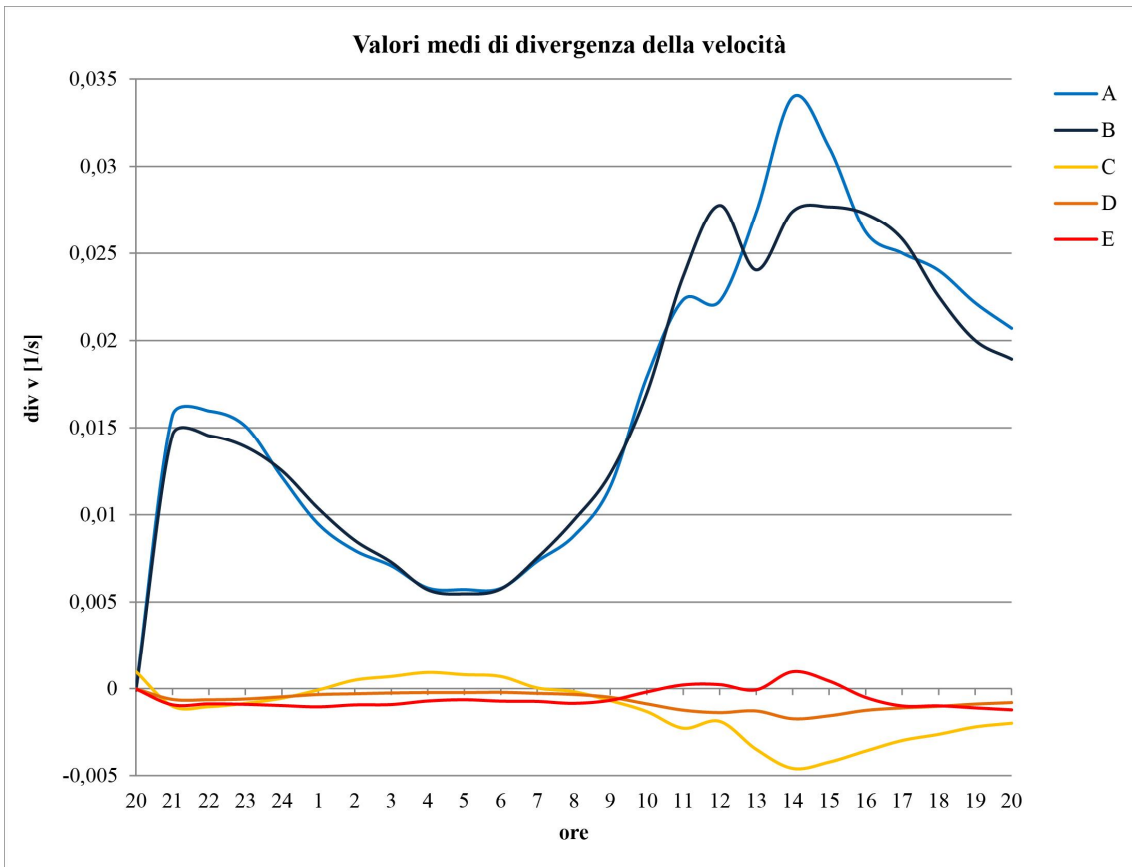


Fig. 5.16: Valori medi del campo della divergenza della velocità in determinate aree.

5.3 Risultati numerici

5.3.1 Campi di temperature e velocità

I primi risultati presentati sono i campi delle temperature (scala di colori) e velocità (freccie) di alcuni istanti del ciclo di ventilazione notturna e pre-raffreddamento delle masse dei due profili 10hV e 24hV (Figura 5.17). Vengono riportati tre istanti di tempo significativi per descrivere il moto dell'aria dopo l'apertura delle finestre (ore 20:00), rispettivamente dopo 1 minuto, 10 minuti e 10 ore.

I campi di temperatura e velocità permettono di descrivere il moto intorno alle masse e consentono di apprezzare il loro raffreddamento durante l'intero ciclo di ventilazione notturna.

Vale la pena notare che la perdita di simmetria nel campo delle velocità rispetto alla simmetria della sezione è dovuta alle condizioni al bordo ed iniziali di temperatura non omogenee a causa dell'orientamento dell'edificio e della radiazione solare incidente.

In Figura 5.18 vengono mostrati i campi di temperatura e velocità durante la ventilazione diurna (profilo 24hV), ottenuti alle ore 11:00, 15:00 e 19:00. In Figura 5.19 si riportano i dati ottenuti per i medesimi istanti di tempo nella simulazione a finestre costantemente chiuse, ovvero il profilo NoV.

In Figura 5.20 si riportano i dati relativi al profilo 10hV: per quanto riguarda il ciclo di ventilazione notturna i campi delle temperature corrispondono alla Fig. 5.17; in Fig. 5.20 sono presenti alcuni istanti ritenuti interessanti, relativi alle ore 09:00, 09:50 e 10:00, al fine di apprezzare i cambiamenti interni indotti dalla chiusura delle finestre e dall'aumento dei carichi termici interni ed esterni.

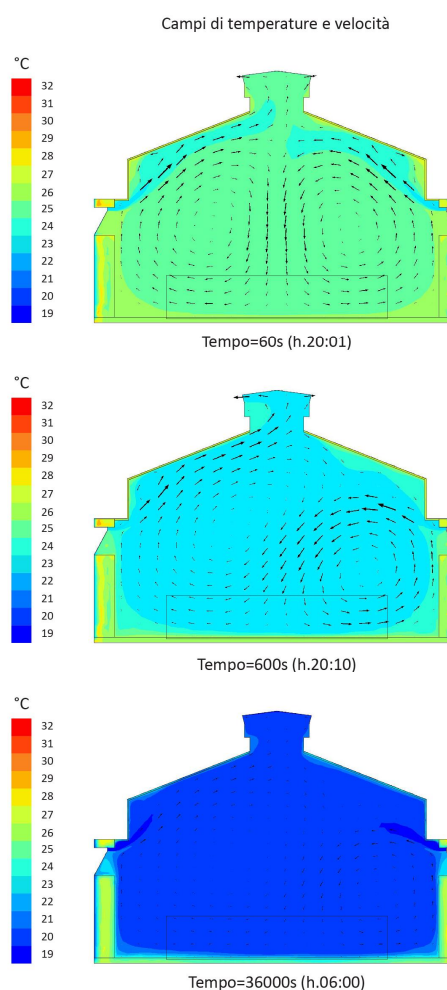


Fig. 5.17: Campi di temperature e velocità dopo l'apertura delle finestre, dopo 1 minuto, 10 minuti e 10 ore, rispettivamente alle ore 20:01, 20:10 e 06:00.

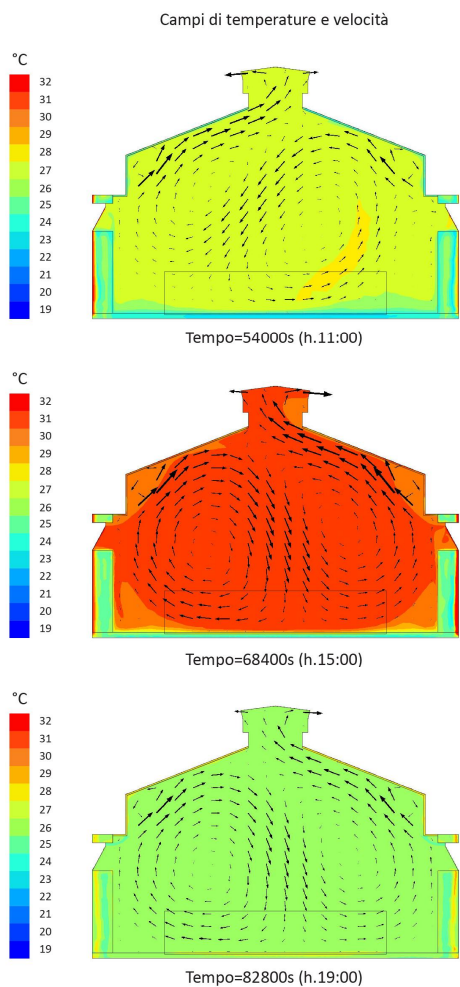


Fig. 5.18: Campi di temperature e velocità durante la ventilazione diurna, alle ore 11:00, 15:00 e 19:00.

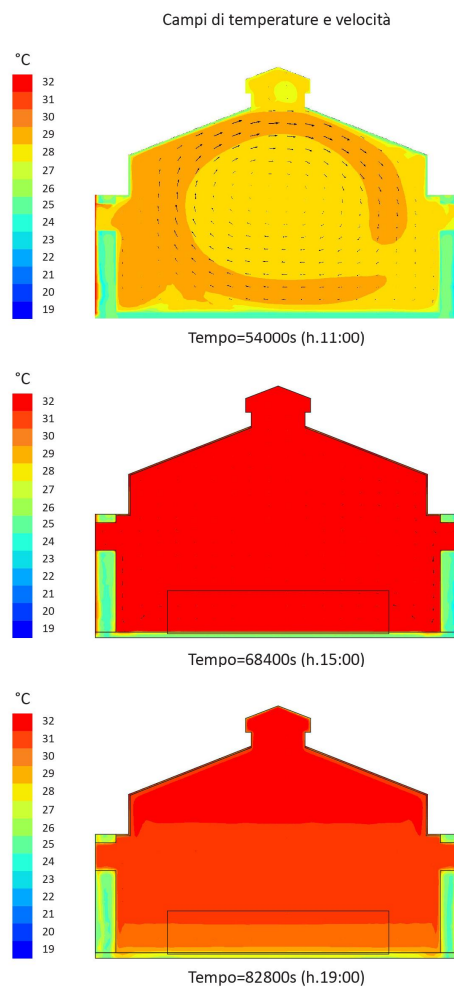


Fig. 5.19: Campi di temperature e velocità del profilo NoV (a finestre chiuse), alle ore 11:00, 15:00 e 19:00.

In Fig. 5.21 vengo riportati i campi relativi ai tre istanti di tempo (11:00, 15:00, 19:00) nelle ore diurne, a finestre chiuse, del profilo NoV.

Successivamente vengono mostrati dei grafici che riportano i valori medi di temperatura dell'aria della zona occupata, precedentemente definita ed evidenziata in Figura 5.11, nei tre profili d'uso.

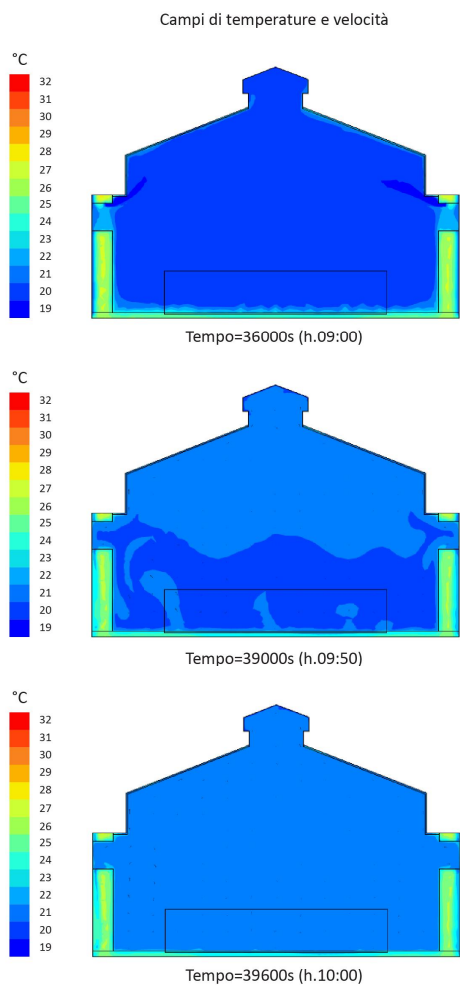


Fig. 5.20: Campi di temperature e velocità del profilo 10hV, alle ore 09:00, 09:50 e 10:00.

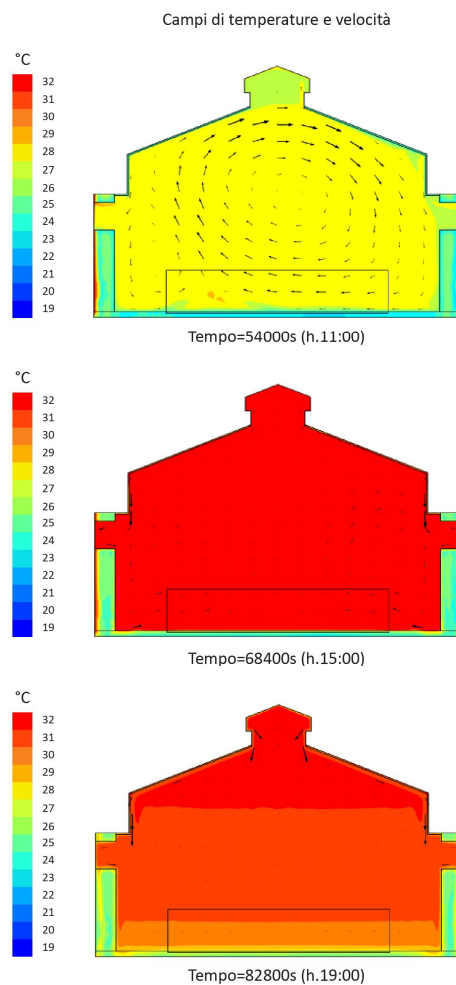


Fig. 5.21: Campi di temperature e velocità del profilo 10hV, alle ore 11:00, 15:00 e 19:00.

Osservando i dati riportati in Figura 5.22 è possibile condurre alcune considerazioni:

- Nell'istante iniziale, la temperatura media dell'aria nella zona occupata è di 27°C, circa 3°C superiore alla temperatura dell'aria esterna;
- Durante il ciclo di ventilazione notturna (20:00-06:00) la temperatura media dell'aria nella zona occupata dei due profili 24hV e 10hV subisce un repentino abbassamento e si mantiene inferiore a quella del profilo NoV (a finestre chiuse) di circa 4-5°C.
- In tutti e tre i profili la temperatura media dell'aria nella zona occupata ha un fortissimo incremento durante l'affollamento massimo nelle ore di utilizzo (11:00-17:00).

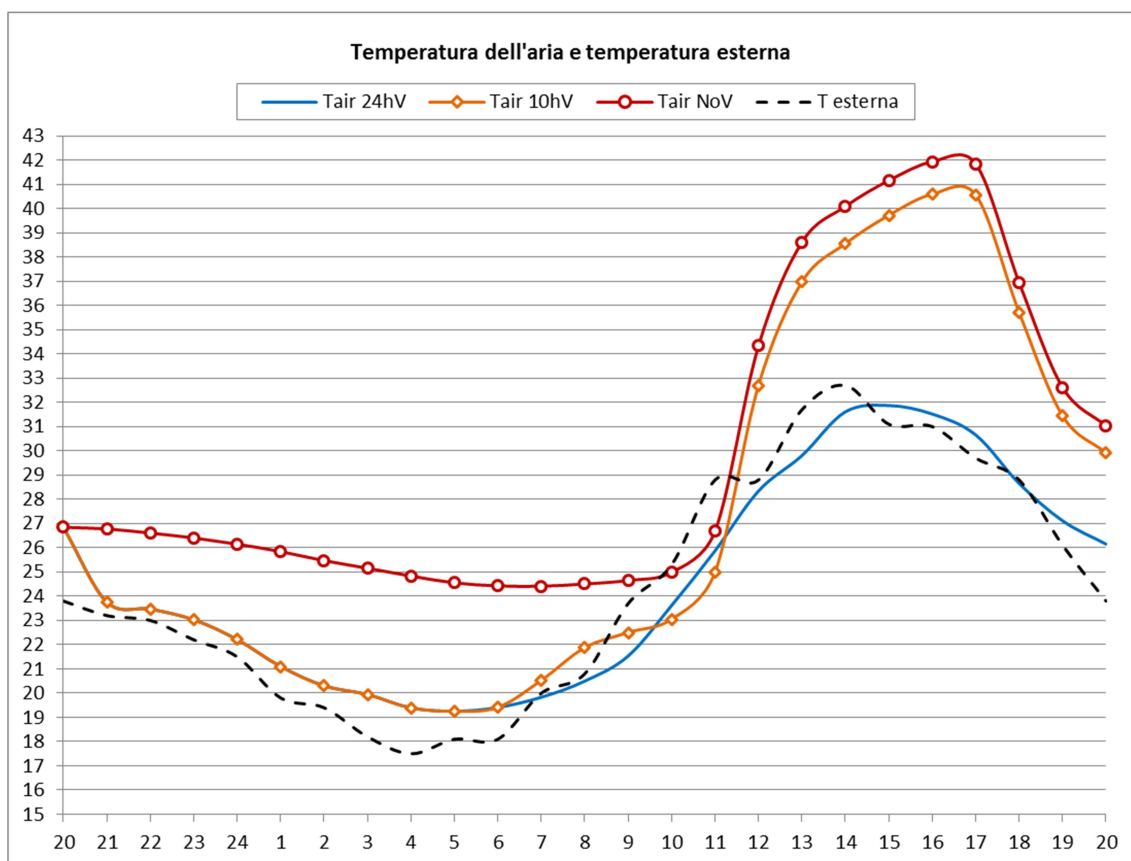


Fig. 5.22: Temperature dell'aria (medie volumetriche) del volume della zona occupata nei tre profili e temperatura dell'aria esterna, nell'arco delle 24 ore di simulazione.

5.3.2 Temperature operative e range di comfort

I dati precedentemente commentati si riferiscono alla temperatura dell'aria della zona occupata. Risulta di particolare interesse, invece, commentare un'altra grandezza, la temperatura operativa T_{op} definita da:

$$T_{op} = \frac{T_a + T_{mr}}{2} \quad (5.8)$$

dove:

T_a = temperatura dell'aria;

T_{mr} = temperatura media radiante⁴⁷.

La temperatura operativa può essere definita come quella temperatura uniforme dell'aria e delle

⁴⁷ Media, ponderata sulle aree, delle temperature delle superfici degli elementi dell'ambiente circostante.

pareti dell'ambiente che provocherebbe, per l'individuo, lo stesso scambio termico per convezione e radiazione che si ha nell'ambiente reale.

In Figura 5.23 vengono riportati i valori medi di temperatura operativa, monitorata nella zona occupata, per le tre simulazioni (dalle 20:00 alle 20:00) comparati ai valori della temperatura esterna ottenuti dal file climatico.

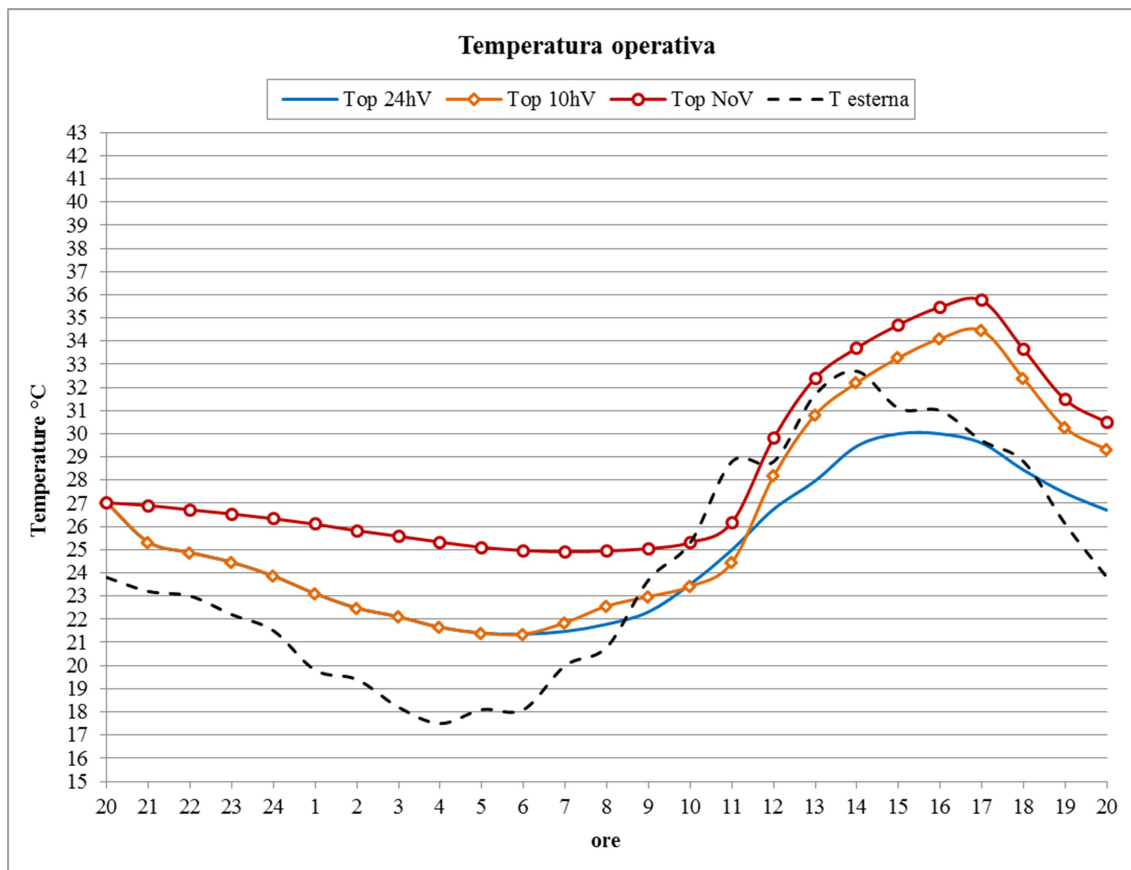


Fig. 5.23: Temperatura esterna e temperature operative dei 3 profili a confronto, nell'arco delle 24 ore di simulazione.

Come prima considerazione, si nota che le temperature operative hanno i picchi diurni sensibilmente inferiori alla temperatura dell'aria (2-6°C), dovuto alla presenza di temperature superficiali degli elementi massivi più basse delle temperature dell'aria.

Riguardo al profilo d'uso di ventilazione notturna e diurna (24hV) si può osservare che, a meno di piccoli intervalli, le temperature operative sono sempre inferiori delle temperature esterne. La ventilazione continuativa permette un abbassamento del picco delle temperature esterne di 2,7°C e uno sfasamento temporale di circa un'ora.

Comparando il profilo 24hV con il profilo 10hV (sola ventilazione notturna), si osserva che le

due curve hanno un distacco repentino intorno alle 11:00, orario in cui l'affollamento raggiunge il livello massimo. Questo conferma l'efficacia della ventilazione diurna nella dissipazione dei carichi interni, quando questi sono elevati.

Comparando i profili 10hV e NoV si deduce che in entrambi i casi i carichi interni determinano fortemente il loro andamento e che il pre-raffreddamento delle masse non può diminuire significativamente i picchi di temperatura operativa diurna ma può fornire una diminuzione media di 1,5°C. L'efficacia della strategia di ventilazione diurna è rafforzata dal grafico di Figura 5.24, dove vengono comparate le medie delle temperature dell'aria e delle temperature medie radianti dei tre profili d'uso.

E' interessante notare che l'elevata inerzia termica dell'edificio permette di avere temperature medie radianti delle superfici interne delle masse termiche più basse delle temperature dell'aria. Inoltre, in entrambi gli andamenti delle temperature possono essere notati gli effetti di smorzamento e sfasamento dell'onda termica esterna.

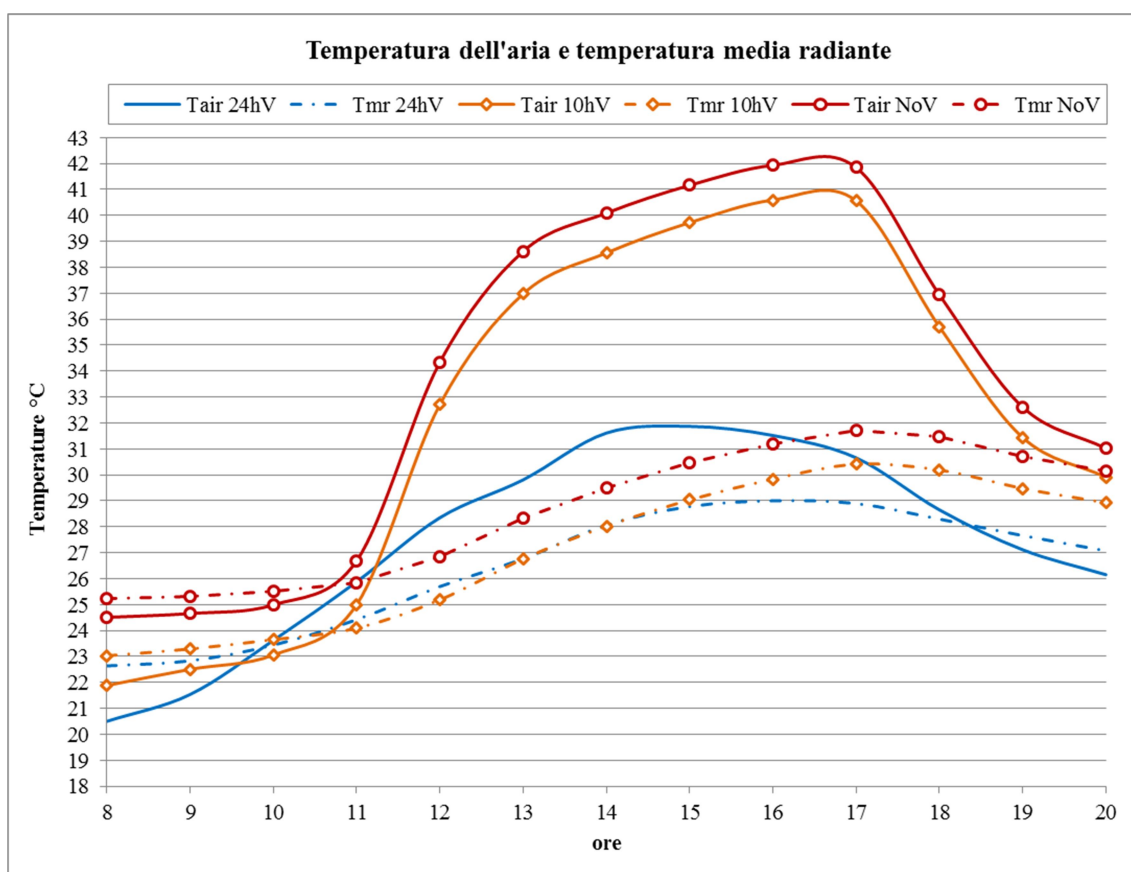


Fig. 5.24: Temperatura dell'aria e temperature media radiante dei 3 profili, dalle 08:00 alle 20:00.

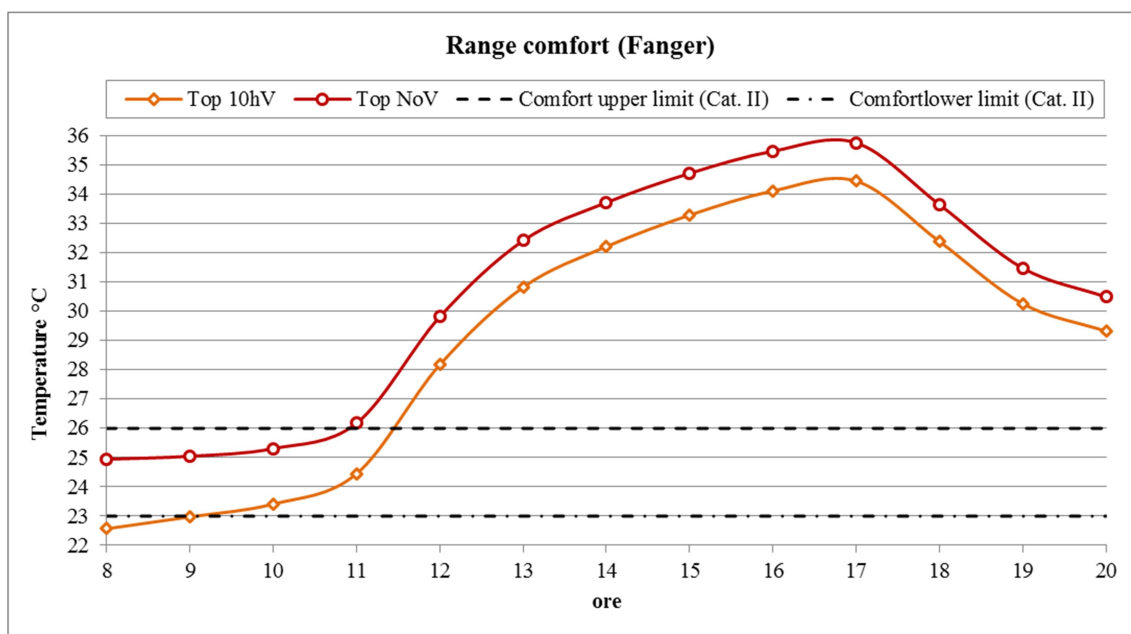


Fig. 5.25: Temperatura operativa dei profili d'uso NoV e 10hV e range di comfort secondo il modello di Fanger (Categoria II, ± 0.5 PMV e PPD < 10%).

I tre profili delle temperature medie radianti durante le ore di utilizzo (dalle 8:00 alle 20:00) sono collegati sia a condizioni differenti, in relazione o meno della ventilazione notturna, sia alle variazioni di temperatura dell'aria interna, in accordo o meno con l'apertura delle finestre durante le ore di occupazione.

Comparando i risultati dei profili NoV e 10hV si può notare che la ventilazione notturna riduce abbastanza uniformemente sia la temperatura dell'aria interna che la temperatura media radiante.

In aggiunta, il profilo 24hV mostra che la temperatura dell'aria raggiunge picchi comparabili con la temperatura esterna (32°C) e che la diminuzione delle temperature operative indicata in Figura 5.23 dipende sostanzialmente dalla temperatura media radiante delle masse raffrescate.

Nella Figura 5.25 vengono riportate le temperature operative dei profili d'uso NoV e 10hV durante le ore di utilizzo (08:00-20:00) e il range di comfort che dovrebbe essere raggiunto con il supporto dell'impianto HVAC.

Poiché in entrambi i profili d'uso non è prevista la ventilazione naturale, il range di comfort è ottenuto mediante il modello di Fanger, come precedentemente descritto, in relazione ad una categoria appropriata e al tipo di edificio. In particolare, il range utilizzato è quello della Categoria II (normale livello di aspettativa), che generalmente si utilizza per edifici nuovi o riqualificati, con una limitazione sugli indici di \pm PMV e PPD < 10%. Il tipo di edificio di

riferimento è classe/ufficio, con un'attività degli utenti sedentaria corrispondente a 1,2 met. Bisogna sottolineare che in entrambi i casi la temperatura operativa supera il range di comfort superiore tra le 11:00 e le 20:00 e dunque, nei due profili d'uso, è confermata la necessità dell'utilizzo dell'impianto HVAC.

Gli effetti della ventilazione notturna possono essere misurati in termini di calore dissipato dalle masse attraverso le loro superfici interne durante la notte. Integrando questi flussi termici superficiali nel tempo e nello spazio si ottiene la quantità di energia dissipata pari a 48,87 MJ, comparata a una più modesta quantità di 0,85 MJ dissipati in caso di finestre chiuse.

In ogni caso, al fine di stimare in maniera esaustiva il contributo della ventilazione notturna sulla riduzione della richiesta all'impianto HVAC sarebbe opportuno includere gli effetti di un eventuale aumento dell'umidità indotti dall'utilizzo di questa strategia e valutare l'impatto di una eventuale deumidificazione sul consumo complessivo dell'impianto HVAC.

In Figura 5.26 viene riportato l'andamento della temperatura operativa del profilo d'uso 24hV durante le ore di utilizzo (08:00-20:00). Poiché in questo caso viene utilizzata una strategia che prevede la ventilazione naturale, il range di comfort è ottenuto mediante il modello adattivo, utilizzando categoria e tipo di edificio precedentemente descritte. Le temperature operative predette risultano sempre all'interno del range dato.

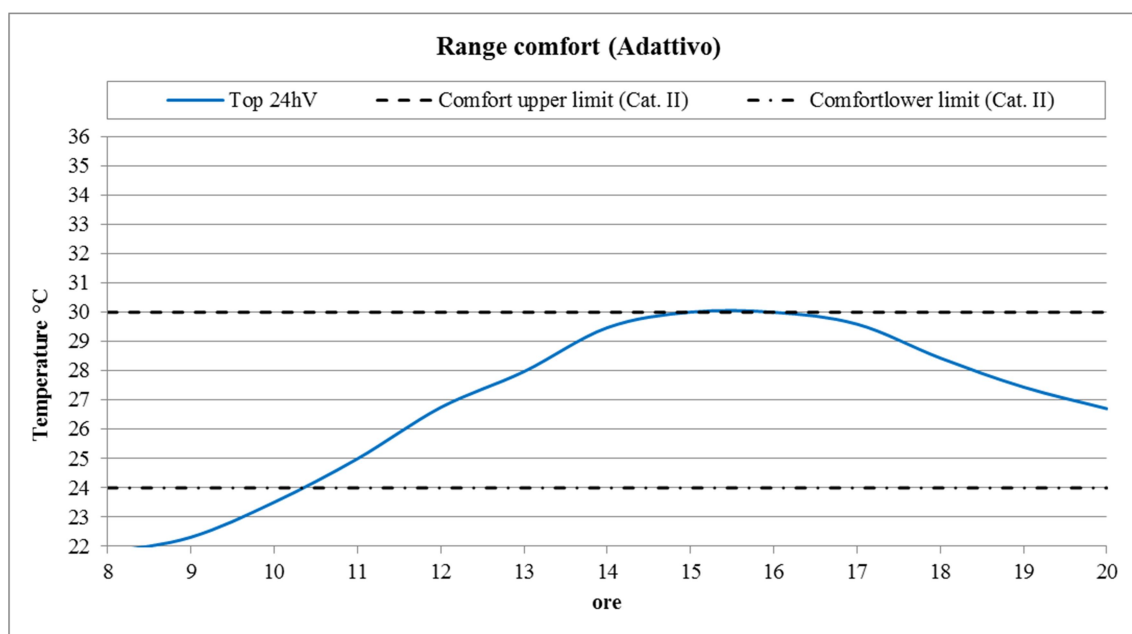


Fig. 5.26: Temperatura operativa del profilo d'uso 24hV e range di comfort secondo il modello Adattivo (Categoria II, ± 0.5 PMV e PPD < 10%).

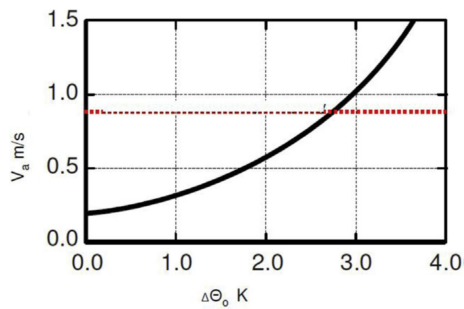


Fig. 5.27: Velocità dell'aria richiesta per aumentare il range di comfort (EN ISO 7730:2006).

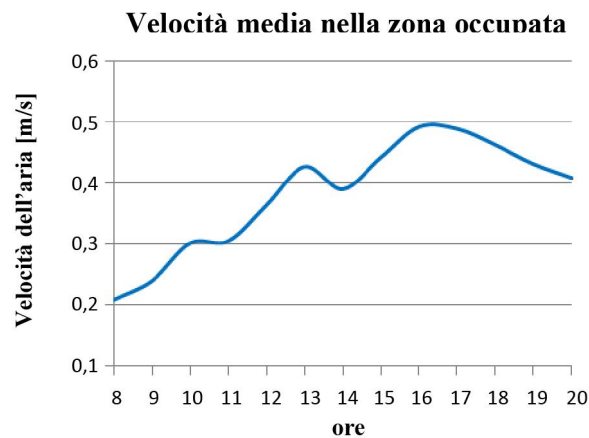


Fig. 5.28: Velocità media dell'aria nella zona occupata durante le ore di ventilazione diurna del profilo 24hV.

Nel caso in cui la temperatura operativa superi il limite superiore del comfort termico adattativo, EN 15251:2007 [332] e EN ISO 7730:2006 [330] suggeriscono una tolleranza aggiuntiva nel range di comfort (Fig. 5.27) applicabile agli edifici in *free-running*, quando gli utenti hanno la possibilità di aprire le finestre e controllare la velocità dell'aria locale.

Infatti, in condizioni di comfort estivo (temperature operative interne $> 25^{\circ}\text{C}$) è possibile aumentare la velocità dell'aria per estendere il limite massimo di comfort. Anche se in questo caso non è necessario, attraverso le analisi numeriche eseguiti si può determinare il valore medio di velocità dell'aria nella zona occupata, monitorata durante le ore di occupazione, come mostrato in Fig. 5.28. Vale la pena notare che il valore della velocità dell'aria locale è sempre al di sotto della linea rossa in Fig. 5.27, che indica una velocità dell'aria al di sopra della quale si avrebbe un discomfort (fogli sollevati, etc.).

5.3.1 Commento dei risultati

La CFD si rivela uno strumento prezioso laddove si vogliano comparare le prestazioni di comportamenti termici di edifici con l'obiettivo di misurare le prestazioni in termini di comfort. Il motivo fondamentale è perché alla base delle teorie del comfort adattivo c'è il comportamento passivo dell'edificio, nell'ambito del quale 2 caratteristiche fondamentali termofisiche da mettere in conto sono:

- L'inerzia termica;
- La raggiungibilità delle masse termiche da flussi di aria esterna.

Il caso di studio analizzato si presta alla comparazione di diverse strategie di ventilazione naturale, che risultano essere profondamente realistiche in relazione al fatto che:

- L'edificio è pubblico e suscettibile di affollamento;
- Di notte non viene utilizzato e quindi non presenta nessuna controindicazione nei riguardi della ventilazione notturna;
- Si trova al centro della città di Roma e quindi si possono presentare condizioni di inquinamento dell'aria e rumorosità del traffico che possano far preferire una strategia in cui le finestre rimangano prevalentemente chiuse di giorno e il comfort viene interamente delegato all'impianto HVAC.

I risultati confermano l'auspicabilità dell'utilizzo di strategie di ventilazione naturale, come strumento principe di controllo del comfort in un contesto di edifici dotati di grande inerzia termica.

La CFD dunque si conferma un valido strumento nel quantificare gli effetti indotti dal raffrescamento passivo da ventilazione naturale anche ai fini di una misura delle condizioni di comfort.

Conclusioni

Il lavoro svolto in questa tesi di dottorato ha avuto come obiettivo quello fornire una discussione sulla modellazione del raffrescamento passivo da ventilazione naturale negli edifici, in particolare quando si tratta di valutare aspetti legati a comfort e risparmio energetico degli edifici del patrimonio.

Una prima sezione è stata dedicata ad un inquadramento dello stato dell'arte; di particolare interesse il fatto che negli ultimi anni il numero di ricerche su questo tema sta aumentando in maniera esponenziale in vari angoli del mondo ed in particolar modo in Italia, da sempre leader nello studio degli aspetti energetici del patrimonio. Questa tendenza, va a confermare che il lavoro intrapreso nel 2013, con la mia tesi di laurea sul raffrescamento degli edifici in area mediterranea, ha iniziato un percorso in una direzione valida, che sta trovando sempre più sostenitori e studiosi.

L'interesse verso queste tematiche, mosso dal fascino delle antiche strategie di raffrescamento presenti storicamente in area mediterranea che ad oggi, per motivi legati a complesse questioni prestazionali, sociali, economiche e culturali sono poco utilizzate se non completamente dimenticate, mi ha portato allo studio dei fenomeni che governano il moto dell'aria e gli scambi termici che avvengono in presenza di ventilazione naturale e masse termiche.

L'utilizzo di modelli numerici, come quelli di termo-fluido dinamica computazionale, permette di descrivere in maniera dettagliata le temperature interne, il moto dell'aria, le condizioni microclimatiche di comfort e il raffrescamento delle masse termiche, consentono di stimare il risparmio energetico legato all'utilizzo di strategie passive o ibride.

Il modello descritto e presentato in questa tesi rappresenta un primo passo verso un approccio scientificamente più completo. Varrebbe la pena, infatti, implementare un modello di turbolenza, necessario quando si opera in ambienti con altezze considerevoli, come quelli propri dell'architettura storica. Un aspetto che non può essere trascurato, quando si parla di edifici del patrimonio in area mediterranea caldo-umida, è il trasporto dell'umidità nell'aria e, soprattutto in presenza di materiali da costruzione igroscopici, nelle strutture stesse. Tale valutazione deve essere inclusa nel modello numerico poiché diventa di fondamentale importanza sia nella valutazione del comfort termico, sia in termini di conservazione dell'edificio stesso o dei manufatti presenti al suo interno.

Per sviluppi futuri si può pensare di arricchire il modello mediante i seguenti passi:

- condurre una campagna di misurazioni nell'edificio studiato, con l'obiettivo di procedere ad una validazione sperimentale e calibrazione del modello numerico;

- integrare nel set di equazioni il trasporto di agenti inquinanti, al fine di includere nello studio la presenza di particelle dannose per la salute;
- simulare numericamente l'impianto HVAC al fine di determinare gli effetti positivi di strategie ibride, come l'utilizzo della sola ventilazione notturna, e poter determinare gli effetti del pre-raffreddamento delle masse termiche in termini di risparmio energetico.

Bibliografia

- [1] C. Balocco, F. Farnetti and G. Minutoli, I sistemi di ventilazione naturale negli edifici storici. Palazzo Pitti a Firenze e Palazzo Marchese a Palermo., Firenze: Alinea Editrice, 2009.
- [2] P. V. Nielsen, F. Allard, H. B. Awbi and A. Schalin, Fluidodinamica computazionale applicata alla progettazione della ventilazione, Palermo: Dario Flaccovio, 2008.
- [3] M. Carlini and S. Castellucci, "Modelling and Simulation for Energy Production Parametric Dependence in Greenhouses," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2010, p. 28, 2010.
- [4] G. V. Fracastoro, G. Mutani and M. Perino, "Experimental and theoretical analysis of natural ventilation by windows opening," *Energy and Buildings*, vol. 34, pp. 817-827, 2002.
- [5] G. Fracastoro, M. Perino and M. Simonetti, "CFD transient analysis of night cooling strategy applied to school building.," in *IAQVEC 2007 - Kagawa Printing Corporation*, Sendai, 2007.
- [6] B. Rudofsky, *Architecture Without Architects: A Short Introduction to Non-pedigreed Architecture*, Garden City, New York: Doubleday Company Inc, 1964.
- [7] A. Picone, *La casa araba d'Egitto: costruire con il clima dal vernacolo ai maestri contemporanei*, Milano: Editoriale Jaca Book Spa, 2009.
- [8] C. E. Gadda, *La nostra casa si trasforma e l'inquilino la deve subire*, 2008 ed., vol. Saggi Giornali Favole ed altri scritti I, Milano: Garzanti, 1991.
- [9] n. 4. Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, 2004.
- [10] n. 6. Decreto Legislativo 26 marzo 2006, 2006.
- [11] G. n. 8. d. 9. a. 2008, 2008.
- [12] D. g. B. A. e. Paesaggio. [Online]. Available: www.pabaac.beniculturali.it/.
- [13] 2. a. n. Legge, *Commissione Franceschini*, 1964.
- [14] L. Mazzarella, "Energy retrofit of historic and existing buildings. The legislative and regulatory point of view," *Energy and Buildings*, vol. 95, pp. 23-31, 2015.
- [15] M. Filippi, "Remarks on the green retrofitting of historic buildings in Italy," *Energy and Buildings*, vol. 95, pp. 15-22, 2015.

- [16] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz and C. Pout, "A review on buildings energy consumption information," *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 3, pp. 394-398, 2008.
- [17] 93/76/CEE, 1993.
- [18] 2002/91/CE, 2002.
- [19] 2010/31/CE, 2010.
- [20] ec.europa.eu, "La strategia Europa 2020," [Online]. Available: https://ec.europa.eu/info/strategy/european-semester/framework/europe-2020-strategy_it.
- [21] Commissione Europea, *Energia pulita per tutti gli europei: liberare il potenziale di crescita dell'Europa*, Bruxelles, 2016.
- [22] Climate for Culture, 2009-2014. [Online]. Available: <https://www.climateforculture.eu/index.php?inhalt=home>.
- [23] IPCC, Climate Change 2014 Synthesis Report, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.
- [24] A. Martínez-Molina, I. Tort-Ausina, S. Cho and J. L. Vivancos, "Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 61, pp. 70-85, 2016.
- [25] A. Prömmel, "Increase energy efficiency in existing building," *Habitat International*, vol. 3, no. 5/6, pp. 569-575, 1978.
- [26] K. Johnsen, "Energy conservation in the built environment," *Build Environ*, vol. 15, p. 203, 1980.
- [27] F. Butera, A. D'Orso, S. Farruggia, G. Rizzo and G. Silvestrini, "Energy conservation in 29 historic school buildings in Palermo," *Int J Ambient Energy*, vol. 6, pp. 71-78, 1985.
- [28] M. N. A. Said, W. C. Brown, C. J. Shirtliffe and A. H. P. Maurenbrecher, "Monitoring of the building envelope of a heritage house: a case study," *Energy and Buildings*, vol. 30, pp. 211-219, 1999.
- [29] R. Cataldo, A. De Donno, G. De Nunzio, G. Leucci, L. Nuzzo and S. Siviero, "Integrated methods for analysis of deterioration of cultural heritage: the Crypt of "Cattedrale di Otranto"," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 6, pp. 29-38, 2005.
- [30] L. Samek, A. De Maeyer-Worobiec, Z. Spolnik, L. Bencs, V. Kontozova, Ł. Bratasz, R. Kozłowski and R. Van Grieken, "The impact of electric overhead radiant heating on the indoor environment of historic churches," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 8, pp. 361-

369, 2007.

- [31] D. Camuffo, P. Brimblecombe, R. Van Grieken, H. Busse, G. Sturaro, A. Valentino, A. Bernardi, N. Blades, D. Shooter, L. De Bock, K. Gysels, M. Wieser and O. Kim, "Indoor air quality at the Correr Museum, Venice, Italy," *The Science of the Total Environment*, vol. 236, pp. 135-152, 1999.
- [32] A. Bernardi, V. Todorov and J. Hiristova, "Microclimatic analysis in St. Stephan's church, Nessebar, Bulgaria after interventions for the conservation of frescoes," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 1, pp. 281-286, 2000.
- [33] D. Camuffo, E. Pagan, A. Bernardi and F. Becherini, "The impact of heating, lighting and people in re-using historical buildings a case study," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 5, pp. 409-416, 2004.
- [34] M. La Gennusa, G. Rizzo, G. Scaccianoce and F. Nicole, "Control of indoor environments in heritage buildings: experimental measurements in an old Italian museum and proposal of a methodology," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 6, pp. 147-155, 2005.
- [35] S. Costanzo, A. Cusumano, C. Giaconia and G. Giaconia, "Preservation of the artistic heritage within the seat of the Chancellorship of the University of Palermo. A proposal on a methodology regarding an environmental investigation according to," *Building and Environment*, vol. 41, pp. 1847-1859, 2005.
- [36] G. Loupa, E. Charpantidou, I. Kioutsoukis and S. Rapsom, "Indoor microclimate, ozone and nitrogen oxides in two medieval churches in Cyprus," *Atmospheric Environment*, vol. 40, pp. 7457-7466, 2006.
- [37] L. de Santoli, F. Cumo and M. Mariotti, "Air curtain as a barrier against pollutants in cultural heritage A case study," in *Air pollution*, 2006.
- [38] L. Bencs, Z. Spolnik, D. Limpens-Neilen, H. L. Schellen, B. Jütte and R. Van Grieken, "Comparison of hot-air and low-radiant pew heating systems on the distribution and transport of gaseous air pollutants in the mountain church of Rocca Pietore from artwork," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 8, pp. 264-271, 2007.
- [39] C. Balocco and G. Grazzini, "Plant refurbishment in historical buildings turned into museum," *Energy and Building*, vol. 39, pp. 693-701, 2006.
- [40] C. Balocco, "Daily natural heat convection in a historical hall," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 8, pp. 370-376, 2007.
- [41] L. de Santoli and M. Mariotti, "Natural ventilation strategies for passive climate control in

the archaeological area of the tempio di Ercole Vincitore in Tivoli," 2007.

- [42] C. Balocco and G. Grazzini, "Numerical simulation of ancient natural ventilation systems of historical buildings. A case study in Palermo," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 10, p. 313–318, 2009.
- [43] S. Tadeu, C. Rodrigues, A. Tadeu, F. Freire and N. Simões, "Energy retrofit of historic buildings Environmental assessment of cost-optimal solutions," *Journal of Building Engineering*, vol. 4, pp. 167-176, 2015.
- [44] L. Tang, M. Nikolopoulou, F. Zhao and N. Zhang, "CFD modeling of the built environment in Chinese historic settlements," *Energy and Buildings*, vol. 55, pp. 601-606, 2012.
- [45] F. Salata, I. Golasi, A. de Lieto Vollaro and R. de Lieto Vollaro, "How high albedo and traditional buildings' materials and vegetation affect the quality of urban microclimate. A case study," *Energy and Buildings*, vol. 99, pp. 32-49, 2015.
- [46] A. Byrne, G. Byrne, G. O'Donnell and A. Robinson, "Case studies of cavity and external wall insulation retrofitted under the Irish Home Energy Saving Scheme: Technical analysis and occupant perspectives," *Energy and Buildings*, vol. 130, pp. 420-433, 2016.
- [47] C. Becchio, D. Ferrando, E. Fregonara and N. Milani, "The cost-optimal methodology for the energy retrofit of an ex-industrial building located in Northern Italy," *Energy and Buildings*, vol. 127, pp. 590-602, 2016.
- [48] F. Pérez Gálvez, P. Rubio de Hita, M. Ordóñez Martín, M. J. Morales Conde and C. Rodríguez Liñán, "Sustainable restoration of traditional building systems in the historical centre of Sevilla (Spain)," *Energy and Buildings*, vol. 62, pp. 648-659, 2013.
- [49] P. De Berardinis, M. Rotilio, C. Marchionni and A. Friedman, "Improving the energy-efficiency of historic masonry buildings. A casestudy A minor centre in the Abruzzo region, Italy," *Energy and Buildings*, vol. 80, pp. 415-423, 2014.
- [50] M. Fox, D. Coley, S. Goodhew and P. De Wilde, "Time-lapse thermography for building defect detection," *Energy and Buildings*, vol. 92, pp. 95-106, 2015.
- [51] K. Fabbri and B. Brunetti, "The Attic and its Effect on the Energy Performance of Historic Buildings," *Energy Procedia - 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015*, vol. 78, pp. 1281-1286, 2015.
- [52] K. Sterflinger, J. Ettenauer and G. Piñar, "Bio-susceptibility of materials and thermal insulation systems used for historical buildings," *Energy Procedia*, vol. 40, pp. 499-506,

2013.

- [53] E. Stocker, M. Tschurtschenthaler and L. Schrott, "Cost-optimal renovation and energy performance: Evidence from existing school buildings in the Alps," *Energy and Buildings*, vol. 100, pp. 20-26, 2015.
- [54] C. S. Polo López and F. Frontini, "Energy efficiency and renewable solar energy integration in heritage," *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 1493-1502, 2014.
- [55] K. Buvik, G. Andersen and S. Tangen, "Ambitious renovation of a historical school building in cold climate," *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 1442-1448, 2014.
- [56] C. D. Şahin, Z. D. Arsan, S. S. Tunçoku, T. Broström and G. G. Akkurt, "A transdisciplinary approach on the energy efficient retrofitting of a historic building in the Aegean Region of Turkey," *Energy and Buildings*, vol. 96, pp. 128-139, 2015.
- [57] J. Zagorskas, E. Zavadskas, Z. Turskis and M. Burin, "Thermal insulation alternatives of historic brick buildings in Baltic Sea Region," *Energy and Buildings*, vol. 78, pp. 35-42, 2014.
- [58] E. Kamendere, L. Grava, K. Zvaigznitis, A. Kamenders and A. Blumberga, "Properties of Bricks and Masonry of Historical Buildings as a Background for Safe Renovation Measures," *Energy Procedia*, vol. 95, pp. 119-123, 2016.
- [59] G. Woroniak and J. Piotrowska-Woroniak, "Effects of pollution reduction and energy consumption reduction in small churches in Drohiczyn community," *Energy and Buildings*, vol. 72, pp. 51-61, 2014.
- [60] A. Alsabry, "Possibilities of decreasing energy consumption through thermal upgrading in selected buildings in Poland case study: The town of Zielona Góra," *Energy and Buildings*, vol. 130, pp. 811-820, 2016.
- [61] P. Blecich, M. Franković and Ž. Kristl, "Energy retrofit of the Krsan Castle: From sustainable to responsible design: A case study.," *Energy and Buildings*, vol. 122, pp. 23-33, 2016.
- [62] L. Đukanović, A. Radivojević and A. Rajčić, "Potentials and limitations for energy refurbishment of multi-family residential buildings built in Belgrade before the World War One," *Energy and Buildings*, vol. 115, pp. 112-120, 2016.
- [63] F. Ascione, F. de Rossi and G. P. Vanoli, "Energy retrofit of historical buildings: theoretical and experimental investigations for the modelling of reliable performance scenarios," *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 1925-1936, 2011.

- [64] A. Maahsen-Milan and K. Fabbri, "Energy restoration and retrofitting. Rethinking restoration projects by means of a reversibility sustainability assessment," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 14S, pp. e41-e44, 2013.
- [65] A. Moschella, A. Salemi, A. Lo Faro, G. Sanfilippo, M. Detommaso and A. Privitera, "Historic Buildings in Mediterranean Area and Solar Thermal Technologies: Architectural Integration vs Preservation Criteria," *Energy Procedia*, vol. 42, pp. 416-425, 2013.
- [66] M. Pretelli, A. Ugolini and K. Fabbri, "Historic plants as monuments preserving, rethinking and re-using historic plants," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 14S, pp. S38-S43, 2013.
- [67] A. Gagliano, F. Nocera, F. Patania, M. Detomaso and V. Sapienza, "Deploy Energy-efficient Technologies in the Restoration of a Traditional Building in the Historical Center of Catania (Italy)," *Energy Procedia*, vol. 62, pp. 62-71, 2014.
- [68] M. Zinzi, S. Agnoli, G. Battistini and G. Bernabini, "Retrofit of an existing school in Italy with high energy standards," *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 1529-1538, 2014.
- [69] P. Principi, R. Fioretti, A. Carbonari and M. Lemma, "Evaluation of energy conservation opportunities through Energy Performance Contracting: A case study in Italy," *Energy and Buildings*, vol. 128, pp. 886-899, 2016.
- [70] E. Negro, T. Cardinale, N. Cardinale and G. Rospi, "Italian Guidelines for Energy Performance of Cultural Heritage and Historical Buildings: The Case Study of the Sassi of Matera," *Energy Procedia*, vol. 97, pp. 7-14, 2016.
- [71] N. Cardinale, G. Rospi and A. Stazi, "Energy and microclimatic performance of restored hypogeous buildings in south Italy: The "Sassi" district of Matera," *Building and Environment*, vol. 45, pp. 94-106, 2010.
- [72] G. Desogus, L. G. F. Cannas and A. Sanna, "Bioclimatic lessons from Mediterranean vernacular architecture: The Sardinian case study," *Energy and Buildings*, vol. 129, pp. 574-588, 2016.
- [73] F. G. S. Giucastro and D. Giordano, "Et(h)nic Architecture in Mediterranean Area," *Energy Procedia*, vol. 96, pp. 868-880, 2016.
- [74] B. Montalbán Pozas and F. Neila González, "Hygrothermal behaviour and thermal comfort of the vernacular housings in the Jerte Valley (Central System, Spain)," *Energy and Buildings*, vol. 130, pp. 219-227, 2016.
- [75] S. Alves, "The Sustainable Heritage of Vernacular Architecture: The Historic Center of

- Oporto," *Procedia Environmental Sciences*, vol. 38, pp. 187-195, 2017.
- [76] P. C. Grindley and S. D. Probert, "Thermal Behaviour of an Eighteenth-Century Athenian Dwelling .," *Applied Energy*, vol. 53, pp. 383-398, 1996.
- [77] M. Philokyprou, A. Michael, E. Malaktou and A. Savvid, "Environmentally responsive design in Eastern Mediterranean. The case of vernacular architecture in the coastal, lowland and mountainous regions of Cyprus," *Building and Environment*, vol. 111, pp. 91-109, 2017.
- [78] A. Michael, D. Demosthenous and M. Philokyprou, "Natural ventilation for cooling in mediterranean climate: A case study in vernacular architecture of Cyprus," *Energy and Buildings*, vol. 144, pp. 333-345, 2017.
- [79] N. Ozay , "A comparative study of climatically responsive house design at various periods of Northern Cyprus architecture," *Building and Environment*, vol. 40, pp. 841-852, 2005.
- [80] B. Kırbaş and N. Hızlı, "Learning from Vernacular Architecture: Ecological Solutions in Traditional Erzurum Houses," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 216, pp. 788-799, 2016.
- [81] S. Kacher, "The identification of the environment disposal of the traditional Algerian houses," *Energy Procedia*, vol. 42, pp. 473-482, 2013.
- [82] L. C. Labaki and D. C. C. K. Kowaltowski, "Bioclimatic and vernacular design in urban settlements of Brazil," *Building and Environment*, vol. 33, pp. 63-77, 1998.
- [83] M. de la Paz Diulio, M. G. Santa Cruz and A. Gómez, "Preventive Conservation Plan for Library Buildings in La Plata, Argentina," *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 1293-1298, 2015.
- [84] M. S. Hatamipour and A. Abedi, "Passive cooling systems in buildings: Some useful experiences from ancient architecture for natural cooling in a hot and humid region," *Energy Conversion and Management*, vol. 49, pp. 2317-2323, 2008.
- [85] P. Keshtkaran, "Harmonization Between Climate and Architecture in Vernacular Heritage: A Case Study in Yazd, Iran," *Procedia Engineering*, vol. 21, pp. 428-438, 2011.
- [86] M. Khalili and S. Amindeldar, "Traditional solutions in low energy buildings of hot-arid regions of Iran," *Sustainable Cities and Society*, vol. 13, pp. 171-181, 2014.
- [87] F. Soflaei, M. Shokouhian and S. Shemirani, "Investigation of Iranian traditional courtyard as passive cooling strategy (a field study on BS climate)," *International Journal of Sustainable Build Environment*, vol. 5, no. 1, pp. 99-113, 2016.

- [88] F. Jomehzadeh, P. Nejat, J. K. Calautit, M. B. M. Yusof, S. A. Zaki, B. R. Hughes and M. N. A. W. M. Yazid, "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*, vol. 70, pp. 736-756, 2017.
- [89] X. Du, R. Bokel and A. van den Dobbelsteen, "Building microclimate and summer thermal comfort in free-running buildings with diverse spaces: A Chinese vernacular house case," *Building and Environment*, vol. 227, p. 215, 2014.
- [90] H. Xu, Q. Huang, G. Liu and Q. Zhang, "A quantitative study of the climate-responsive design strategies of ancient timber-frame halls in northern China based on field measurements," *Energy and Buildings*, vol. 133, pp. 306-320, 2016.
- [91] J. Wang, Z. Yan, X. Wang, Z. Zhang, R. Shang and W. Bi, "Experimental research on mechanical ventilation system for Cave 328 in Mogao Grottoes, Dunhuang, China," *Energy and Buildings*, vol. 130, pp. 692-696, 2016.
- [92] H. Yan, Y. Mao and L. Yang, "Thermal adaptive models in the residential buildings in different climate zones of Eastern China," *Energy and Buildings*, vol. 141, pp. 28-38, 2017.
- [93] A. H. G. Hoseini, U. Berardi, N. D. Dahlan and A. G. Hose, "What can we learn from Malay vernacular houses," *Sustainable Cities and Society*, vol. 13, pp. 157-170, 2014.
- [94] M. K. Singh, S. Mahapatra and S. K. Atreya, "Bioclimatism and vernacular architecture of north-east India," *Building and Environment*, vol. 44, no. 5, pp. 878-888, 2009.
- [95] M. K. Singh, S. Mahapatra and S. K. Atreya, "Thermal performance study and evaluation of comfort temperatures in vernacular buildings of North-East India," *Building and Environment*, vol. 45, no. 2, pp. 320-329, 2009.
- [96] A. S. Dili, M. A. Naseer and T. Z. Varghese, "Passive environment control system of Kerala vernacular residential architecture for a comfortable indoor environment: A qualitative and quantitative analyse," *Energy and Buildings*, vol. 42, pp. 917-927, 2010.
- [97] M. K. Singh, S. Mahapatra and S. K. Atreya, "Solar passive features in vernacular architecture of North-East India," *Solar Energy*, vol. 58, no. 9, pp. 2011-2022, 2011.
- [98] R. Shanthi Priya, M. Sundarraja, S. Radhakrishna and L. Vijayalakshmi, "Solar passive techniques in the vernacular buildings of coastal regions in Nagapattinam, TamilNadu:India : a qualitative and quantitative analysis," *Energy and Buildings*, 2012.
- [99] S. Mitra and S. Bose, "Sustainable Performance of Diverse Regional Vernacular

Architecture of India : Case Study of I. G. R. M. S. Bhopal, INDIA," *Procedia Environmental Sciences*, vol. 37, pp. 495-513, 2017.

- [100] A. T. Nguyen, Q. B. Tran, D. Q. Tran and S. Reiter, "An investigation on climate responsive design strategies of vernacular," *Building and Environment*, vol. 46, pp. 2088-2106, 2011.
- [101] Z. Zhai and J. Previtali, "Ancient vernacular architecture: characteristics categorization and energy performance evaluation," *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 3, pp. 357-365, 2010.
- [102] S. S. Chandel, V. Sharma and B. M. Marwah, "Review of energy efficient features in vernacular architecture for improving indoor thermal comfort conditions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65, pp. 459-477, 2016.
- [103] P. Motealleha, M. Zolfagharia and M. Parsaeeb, "Investigating climate responsive solutions in vernacular architecture of Bushehr city," *HBRC Journal (Article in press)*, 2016.
- [104] A. Gagliano, M. Liuzzo, G. Margani and W. Pettinato, "Thermo-hygrometric behaviour of Roman thermal buildings: the Indirizzo Baths of Catania -Sicily," *Energy and Buildings*, vol. 138, pp. 704-715, 2017.
- [105] M. A. Ealiwa, A. H. Taki, A. T. Howarth and M. R. Seden, "An investigation into thermal comfort in the summer season of Ghadames, Libya," *Building and Environment*, vol. 36, pp. 231-237, 2001.
- [106] D. Camuffo, R. Van Grieken, H. Busse, G. Sturaro, A. Valentino, A. Bernardi, N. Blades, D. Shooter, K. Gysels, F. Deutsch, M. Wieser, O. Kim and U. Ulrych, "Environmental monitoring in four European museums," *Atmospheric Environment*, vol. 35 Supplement No. 1, pp. S127-S140, 2001.
- [107] S. Martín Ocaña, I. Cañas Guerrero and I. González Requena, "Thermographic survey of two rural buildings in Spain," *Energy and Buildings*, vol. 36, pp. 513-523, 2003.
- [108] R. Cantin, J. Burgholzer, G. Guarracino and B. Moujal, "Field assessment of thermal behaviour of historical dwellings in France," *Building and Environment*, vol. 45, pp. 473-484, 2010.
- [109] S. Ghita and T. Catalina, "Energy efficiency versus indoor environmental quality in different Romanian countryside schools," *Energy and Buildings*, vol. 92, pp. 140-154, 2015.

- [110] F. Jomehzadeh, P. Nejat, J. Calautit, M. Yusof, . S. Zaki, B. Hughes and M. Yazid, "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*, 2017.
- [111] T. Kubota and D. Toe, "Application of Passive Cooling Techniques in Vernacular Houses to Modern Urban Houses: A Case Study of Malaysia .," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 179, pp. 29-39, 2015.
- [112] L. Jingxia, "The bioclimatic features of vernacular architecture in China," *Renewable Energy*, vol. 8, pp. 305-308, 1996.
- [113] D. Oktay, "Design with the climate in housing environments: an analysis in Northern Cyprus," *Building and Environment*, vol. 37, pp. 1003-1012, 2002.
- [114] W. Renping and C. Zhenyu, "An ecological assessment of the vernacular architecture and of its embodied energy in Yunnan, China," *Building and Environment*, vol. 41, pp. 687-697, 2006.
- [115] N. Engin, N. Vural, S. Vural and M. R. Sumerkan, "Climatic effect in the formation of vernacular houses in the Eastern Black Sea region," *Building and Environment*, vol. 42, pp. 960-969, 2007.
- [116] N. Vural, S. Vural, N. Engin and M. Resat Sümerkan, "Eastern Black Sea Region—A sample of modular design in the vernacular architecture," *Building and Environment*, vol. 42, pp. 2746-2761, 2007.
- [117] J. Bouillot, "Climatic design of vernacular housing in different provinces of China," *Journal of Environmental Management*, vol. 87, pp. 287-299, 2008.
- [118] J. van Hoof and F. van Dijken, "The historical turf farms of Iceland: Architecture, building technology and the indoor environment," *Building and Environment*, vol. 43, pp. 1023-1030, 2008.
- [119] A. M. Vissilia, "Evaluation of a sustainable Greek vernacular settlement and its landscape: Architectural typology and building physics," *Building and Environment*, vol. 44, pp. 1095-1106, 2009.
- [120] S. Bodach, W. Lang and J. Hamhaber, "Climate responsive building design strategies of vernacular architecture in Nepal," *Energy and Buildings*, vol. 81, pp. 227-242, 2014.
- [121] D. H. C. Toe and T. Kubota, "Comparative assessment of vernacular passive cooling techniques for improving indoor thermal comfort of modern terraced houses in hot-humid

- climate of Malays," *Solar Energy*, vol. 114, pp. 229-258, 2015.
- [122] M. Á. Porta-Gándara, E. Rubio and J. L. Fernández, "Economic feasibility of passive ambient comfort in Baja California dwellings," *Building and Environment*, vol. 37, pp. 993-1001, 2002.
- [123] S. Chiraratananon and V. D. Hien, "Thermal performance and cost effectiveness of massive walls under thai climate," *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 1655-1662, 2011.
- [124] M. K. Singh, S. Mahapatra, S. Atreya and B. Givoni, "Thermal monitoring and indoor temperature modeling in vernacular buildings of North-East India," *Energy and Buildings*, vol. 42, pp. 1610-1618, 2010.
- [125] N. A. M. Omar and S. F. Syed-Fadzil, "Assessment of Passive Thermal Performance for a Penang Heritage Shop house," *Procedia Engineering*, vol. 20, pp. 203-212, 2011.
- [126] Q. Li, X. Sun, C. Chen and X. Yang, "Characterizing the household energy consumption in heritage Nanjing Tulou buildings, China: A comparative field survey study," *Energy and Buildings*, vol. 49, pp. 317-326, 2012.
- [127] Q. Li, R. You, C. Chen and X. Yang, "A field investigation and comparative study of indoor environmental quality in heritage Chinese rural buildings with thick rammed earth wall," *Energy and Buildings*, vol. 62, pp. 286-293, 2013.
- [128] H. Sun and . M. Leng, "Analysis on building energy performance of Tibetan traditional dwelling in cold rural area of Gannan," *Energy and Buildings*, vol. 96, pp. 251-260, 2015.
- [129] S. Gou, Z. Li, Q. Zhao, V. M. Nik and J. L. Scartezzini, "Climate responsive strategies of traditional dwellings located in an ancient village in hot summer and cold winter region of China," *Building and Environment*, vol. 86, pp. 151-165, 2015.
- [130] J. Liu, B. Liu, L. He and Y. Gao, "Investigation on the Winter Building Energy Consumption in Rural Areas in Jinan, China," *Procedia Engineering*, vol. 121, pp. 1819-1826, 2015.
- [131] L. Xiaoyu and J. Beisi, "The Intangible Sustainability on Tangible Flexibility: A Case Study of Vernacular Architecture in Shangjiayang Village, Taishun, China (1814 -1949)," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 179, pp. 141-153, 2015.
- [132] L. Huang, N. Hamza, B. Lan and D. Zahi, "Climate-responsive design of traditional dwellings in the cold-arid regions of Tibet and a field investigation of indoor environments in winter," *Energy and Buildings*, vol. 128, pp. 697-712, 2016.

- [133] J. Liu, L. Wang, Y. Yoshino and Y. Liu, "The thermal mechanism of warm in winter and cool in summer in China traditional vernacular dwellings," *Building and Environment*, vol. 46, pp. 1709-1715, 2011.
- [134] S. Saljoughinejad and S. R. Sharifabad, "Classification of climatic strategies, used in Iranian vernacular residences based on spatial constituent elements," *Building and Environment*, vol. 92, pp. 475-493, 2015.
- [135] R. Soleymanpour, N. Parsaee and M. Banaei, "Climate Comfort Comparison of Vernacular and Contemporary Houses of Iran," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 201, pp. 49-61, 2015.
- [136] F. Soflaei, M. Shokouhian, H. Abraveshdar and A. Alipour, "The impact of courtyard design variants on shading performance in hot: arid climates of Iran," *Energy and Buildings*, vol. 143, pp. 71-83, 2017.
- [137] A. Foruzanmehr, "People's perception of the loggia: A vernacular passive cooling system in Iranian architecture," *Sustainable Cities and Society*, vol. 19, pp. 61-67, 2015.
- [138] M. Saeli and E. Saeli, "Analytical studies of the Sirocco room of Villa Naselli-Ambleri: A XVI century passive cooling structure in Palermo (Sicily)," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 16, pp. 344-351, 2015.
- [139] P. Lankester and P. Brimblecombe, "Future thermohygro-metric climate within historic houses," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 13, pp. 1-6, 2012.
- [140] F. Moran, S. Natarajan and M. Nikolopoulou, "Developing a database of energy use for historic dwellings in Bath, UK," *Energy and Buildings*, vol. 55, pp. 218-226, 2012.
- [141] N. Willand, I. Ridley and A. Pears, "Relationship of thermal performance rating, summer indoor temperatures and cooling energy use in 107 homes in Melbourne, Australia," *Energy and Buildings*, vol. 113, pp. 159-168, 2016.
- [142] G. Martinopoulos, K. T. Papakostas and A. M. Papadopoulos, "Comparative analysis of various heating systems for residential buildings in Mediterranean climate," *Energy and Buildings*, vol. 124, pp. 79-87, 2016.
- [143] K. I. Praseeda, M. Mani and B. V. Venkatarama Reddy, "Assessing Impact of Material Transition and Thermal Comfort Models on Embodied and Operational Energy in Vernacular Dwellings (India)," *Energy Procedia*, vol. 54, pp. 342-351, 2014.
- [144] R. De Lieto Vollaro, L. Evangelisti, E. Carnielo, G. Battista, P. Gori, C. Guattari and A. Fanchiotti, "An Integrated Approach for an Historical Buildings Energy Analysis in a

Smart Cities Perspective," *Energy Procedia*, vol. 45, pp. 372-378, 2014.

- [145] N. Cardinale, G. Rospi and P. Stefanizzi, "Energy and microclimatic performance of Mediterranean vernacular buildings: The Sassi district of Matera and the Trulli district of Alberobello," *Building and Environment*, vol. 59, pp. 590-598, 2013.
- [146] C. Ramírez-Balas, E. D. Fernández-Nieto, G. Narbona-Reina, J. J. Sendra and R. Suárez, "Numerical simulation of the temperature evolution in a room with a mur neutralisant. Application to "The City of Refuge" by Le Corbusier," *Energy and Buildings*, vol. 86, pp. 708-722, 2015.
- [147] A. Bouchair, H. Tebbouche, A. Hammouni, M. Lehtihet and M. Blibli, "Compact Cities as a Response to the Challenging Local Environmental Constraints in Hot Arid Lands of Algeria," *Energy Procedia*, vol. 42, pp. 493-502, 2013.
- [148] A. Salehi, I. Torres and R. A., "An Analytical Approach to the Ventilation Effectiveness of Mediterranean Buildings. Case Study: Existing Residential Building, Portugal," *Energy Procedia*, vol. 96, pp. 613-619, 2016.
- [149] G. Elshafei, A. Negm, M. Bady, M. Suzuki and M. G. Ibrahim, "Numerical and experimental investigations of the impacts of window parameters on indoor natural ventilation in a residential building," *Energy and Buildings*, vol. 141, pp. 321-332, 2017.
- [150] H. Mastouri, B. Benhamou, H. Hamdi and E. Mouyal, "Thermal performance assessment of passive techniques integrated into a residential building in semi-arid climate," *Energy and Buildings*, vol. 143, pp. 1-16, 2017.
- [151] A. L. Pisello, V. L. Castaldo, J. E. Taylor and F. Cotana, "The impact of natural ventilation on building energy requirement at inter-building scale," *Energy and Buildings*, vol. 127, pp. 870-883, 2016.
- [152] M. M. Barbero-Barrera, I. J. Gil-Crespo and L. Maldonado-Ramos, "Historical development and environment adaptation of the traditional cave-dwellings in Tajuña's valley, Madrid, Spain," *Building and Environment*, vol. 82, pp. 536-545, 2014.
- [153] A. Almssad and A. Almusaed, "Environmental reply to vernacular habitat conformation from a vast areas of Scandinavia," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 48, pp. 825-834, 2015.
- [154] M. Harrestrup and S. Svendsen, "Full-scale test of an old heritage multi-storey building undergoing energy retrofitting with focus on internal insulation and moisture," *Building and Environment*, vol. 85, pp. 123-133, 2015.

- [155] L. Tagliabue, F. Leonforte and J. Compostella, "Renovation of an UNESCO Heritage Settlement in Southern Italy: ASHP and BIPV for a "Spread Hotel" Project," *Energy Procedia*, vol. 30, pp. 1060-1068, 2012.
- [156] E. Arumägi and T. Kalamees, "Analysis of energy economic renovation for historic wooden apartment buildings in cold climates," *Applied Energy*, vol. 115, pp. 540-548, 2014.
- [157] Ü. Alev, L. Eskola, E. Arumägi, J. Jokisalo and A. Do, "Renovation alternatives to improve energy performance of historic rural houses in the Baltic Sea region," *Energy and Buildings*, vol. 77, pp. 58-66, 2014.
- [158] P. Resuli and S. Dervishi, "Thermal Performance of Cultural Heritage Italian Housing in Albania," *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 753-758, 2015.
- [159] C. Cristofari, R. Norvaišienė, J. L. Canaletti and G. Notton, "Innovative alternative solar thermal solutions for housing in conservation-area sites listed as national heritage assets," *Energy and Buildings*, vol. 89, pp. 123-131, 2015.
- [160] V. Belpoliti and G. Bizzarri, "A parametric method to assess the energy performance of the social housing stock and simulate suitable retrofit scenarios: An Italian case study," *Energy and Buildings*, vol. 96, pp. 261-271, 2015.
- [161] K. Ghazi Wakili, B. Binder, M. Zimmermann and C. Tanner, "Efficiency verification of a combination of high performance and conventional insulation layers in retrofitting a 130-year old building," *Energy and Buildings*, vol. 82, pp. 237-242, 2014.
- [162] T. Dalla Mora, F. Cappelletti, F. Peron, P. Romagnoni and F. Bauman, "Retrofit of an Historical Building toward NZEB," *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 1359-1364, 2015.
- [163] P. Bonomo and P. De Berardinis, "PV integration in minor historical centers: proposal of guidecriteria in post-earthquake reconstruction planning," *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 1549-1558, 2014.
- [164] A. L. Pisello, A. Petrozzi, V. L. Castaldo and F. Cotana, "Energy Refurbishment of Historical Buildings with Public Function: Pilot Case Study," *Energy Procedia*, vol. 61, pp. 660-663, 2014.
- [165] M. Dabaieh, N. N. Makhlof and O. M. Hosny, "Roof top PV retrofitting: A rehabilitation assessment towards nearly zero energy buildings in remote off-grid vernacular settlements in Egypt," *Solar Energy*, vol. 123, pp. 160-173, 2016.
- [166] F. Stazi, A. Vegliò, C. Di Perna and P. Munafò, "Experimental comparison between 3

different traditional wall constructions and dynamic simulations to identify optimal thermal insulation strategies," *Energy and Buildings*, vol. 60, pp. 429-441, 2013.

- [167] F. Stazi, C. Bonfigli, E. Tomassoni, C. Di Perna and P. Munafò, "The effect of high thermal insulation on high thermal mass: Is the dynamic behaviour of traditional envelopes in Mediterranean climates still possible?," *Energy and Buildings*, vol. 88, pp. 367-383, 2015.
- [168] T. Cardinale, A. Balestra and N. Cardinale, "Thermographic Mapping of a Complex Vernacular Settlement: The Case Study of Casalnuovo District within the Sassi of Matera (Italy)," *Energy Procedia*, vol. 76, pp. 40-48, 2015.
- [169] A. Beizaee, D. Allinson, K. Lomas, E. Foda and L. D.L., "Measuring the potential of zonal space heating controls to reduce energy use in UK homes: The case of un-furnished 1930s dwellings," *Energy and Buildings*, vol. 92, pp. 29-44, 2015.
- [170] T. Kane, S. K. Firth, T. M. Hassan and V. Dimitriou, "Heating behaviour in English homes: An assessment of indirect calculation methods," *Energy and Buildings*, vol. 148, pp. 89-105, 2017.
- [171] A. Pathan, A. Mavrogianni, A. Summerfield, T. Oreszczyn and M. Davies, "Monitoring summer indoor overheating in the London housing stock," *Energy and Buildings*, vol. 141, pp. 361-378, 2017.
- [172] I. G. Hamilton, A. O'Sullivan, G. Huebner, T. Oreszczyn, D. Shipworth, A. Summerfield and M. Davies, "Old and cold? Findings on the determinants of indoor temperatures in English dwellings during cold conditions," *Energy and Buildings*, vol. 141, pp. 142-157, 2017.
- [173] M. Seddiki, K. Anouche, A. Bennadji and P. Boateng, "A multi-criteria group decision-making method for the thermal renovation of masonry buildings: The case of Algeria," *Energy and Buildings*, vol. 129, pp. 471-483, 2016.
- [174] M. Sala, C. S. Polo López, F. Frontini, L. C. Tagliabue and E. De Angelis, "The Energy Performance Evaluation of Buildings in an Evolving Built Environment: An Operative Methodology," *Energy Procedia*, vol. 91, pp. 1005-1011, 2016.
- [175] G. Ciulla, A. Galatioto and R. Ricciu, "Energy and economic analysis and feasibility of retrofit actions in Italian residential historical buildings," *Energy and Buildings*, vol. 128, pp. 649-659, 2016.
- [176] A. Evcil and L. E. Vafaei, "A comparative survey of the energy performances of dwellings

- across Cyprus," *Energy and Buildings*, vol. 148, pp. 15-22, 2017.
- [177] T. Psomas, P. Heiselberg, T. Lyme and K. Duer, "Automated roof window control system to address overheating on renovated houses: Summertime assessment and intercomparison," *Energy and Buildings*, vol. 138, pp. 35-46, 2017.
- [178] T. H. Pedersen, R. E. Hedegaard and S. Petersen, "Space heating demand response potential of retrofitted residential apartment blocks," *Energy and Buildings*, vol. 141, pp. 158-166, 2017.
- [179] F. Roberti, U. F. Oberegger, E. Lucchi and A. Troi, "Energy retrofit and conservation of a historic building using multi-objective optimization and an analytic hierarchy process," *Energy and Buildings*, vol. 138, pp. 1-10, 2017.
- [180] F. Roberti, U. Oberegger and A. Gasparella, "Calibrating historic building energy models to hourly indoor air and surface temperatures: Methodology and case study," *Energy and Buildings*, vol. 108, pp. 236-243, 2015.
- [181] F. Yousefi, Y. Gholipour and W. Yan, "A study of the impact of occupant behaviors on energy performance of building envelopes using occupants' data," *Energy and Buildings*, vol. 148, pp. 182-198, 2017.
- [182] M. Morelli, L. Rønby, S. E. Mikkelsen, M. G. Minzaric and T. Kildemoes, "Energy retrofitting of a typical old Danish multi-family building to a “nearly-zero” energy building based on experiences from a test apartment," *Energy and Buildings*, vol. 54, pp. 395-406, 2012.
- [183] T. Kubota, M. A. Zakaria, S. Abe and D. H. C. Toe, "Thermal functions of internal courtyards in traditional Chinese shophouses in the hot-humid climate of Malaysia," *Building and Environment*, vol. 112, pp. 115-131, 2017.
- [184] R. Tomovska and A. Radivojevic, "Tracing sustainable design strategies in the example of the traditional Ohrid house," *Journal of Cleaner Production*, vol. 147, pp. 10-24, 2017.
- [185] G. Desogus, S. Di Benedetto and R. Ricciu, "The use of adaptive thermal comfort models to evaluate the summer performance of a Mediterranean earth building," *Energy and Buildings*, vol. 104, pp. 350-359, 2015.
- [186] P. Bleich, M. Franković and Ž. Kristl, "Energy retrofit of the Krsan Castle: From sustainable to responsible design-A case study," *Energy and Buildings*, vol. 122, pp. 23-33, 2016.
- [187] Ö. Göçer, Y. Hua and K. Göçer, "Completing the missing link in building design process:

- Enhancing post-occupancy evaluation method for effective feedback for building performance," *Building and Environment*, vol. 89, pp. 14-27, 2015.
- [188] A. Sharma, "Rejuvenating a Space into World Class Environment through Potential Conservation and Energy Saving Techniques," *Energy Procedia*, vol. 115, pp. 70-79, 2015.
- [189] E. Genova, G. Fatta and C. Vinci, "The Recurrent Characteristics of Historic Buildings as a Support to Improve their Energy Performances: The Case Study of Palermo," *Energy Procedia*, vol. 111, pp. 452-461, 2017.
- [190] S. P. Corgnati and M. Perino, "CFD application to optimise the ventilation strategy of Senate Room at Palazzo Madama in Turin (Italy)," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 14, no. 1, pp. 62-69, 2013.
- [191] L. Schibuola, C. Tambani, A. Zarrella and M. Scarpa, "Ground source heat pump performance in case of high humidity soil and yearly balanced heat transfer," *Energy Conversion and Management*, vol. 76, pp. 956-970, 2013.
- [192] A. Gagliano, F. Patania, F. Nocera and C. Signorello, "Assessment of the dynamic thermal performance of massive buildings," *Energy and Buildings*, vol. 72, p. 361-370, 2014.
- [193] F. Ascione, N. Cheche, R. F. De Masi, F. Minichiello and G. P. Vanoli, "Design the refurbishment of historic buildings with the cost-optimal methodology: The case study of a XV century Italian building," *Energy and Buildings*, vol. 99, pp. 162-176, 2015.
- [194] F. Ascione, N. Bianco, C. De Stasio, G. M. Mauro and G. P. Vanoli, "Building Envelope, HVAC Systems and RESs for the Energy Retrofit of a Conference Hall on Naples Promenade," *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 1261-1268, 2015.
- [195] G. Ciampi, A. Rosato, M. Scorpio and S. Sibilio, "Energy and Economic Evaluation of Retrofit Actions on an Existing Historical Building in the South of Italy by Using a Dynamic Simulation Software," *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 741-746, 2015.
- [196] M. Giuliani, G. P. Henze and A. R. Florita, "Modelling and calibration of a high-mass historic building for reducing the rebound effect in energy assessment," *Energy and Buildings*, vol. 116, pp. 434-448, 2016.
- [197] F. Ascione, F. Ceroni, R. F. De Masi, F. de' Rossi and M. R. Pecce, "Historical buildings: Multidisciplinary approach to structural/energy diagnosis and performance assessment," *Applied Energy*, vol. 185, pp. 1517-1528, 2017.
- [198] A. Gagliano, U. Berardi, F. Nocera and N. Salerno, "Influence of Natural Ventilation on

- the Thermal Behavior of a Massive Building," *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 1287-1292, 2015.
- [199] L. Bellia, F. R. d'Ambrosio Alfano, J. Giordano, E. Ianniello and G. Riccio, "Energy requalification of a historical building: A case study," *Energy and Buildings*, vol. 95, pp. 184-189, 2015.
- [200] F. Ascione, N. Bianco, R. F. De Masi, F. de' Rossi and G. P. Vanoli, "Energy retrofit of an educational building in the ancient center of Benevento. Feasibility study of energy savings and respect of the historical value," *Energy and Buildings*, vol. 95, pp. 172-183, 2015.
- [201] G. Franco, A. Magrini, M. Cartesegna and M. Guerrini, "Towards a systematic approach for energy refurbishment of historical buildings. The case study of Albergo dei Poveri in Genoa," *Energy and Buildings*, vol. 95, pp. 153-159.
- [202] D. Milone, G. Peri, S. Pitruzzella and G. Rizzo, "Are the Best Available Technologies the only viable for energy interventions in historical buildings?," *Energy and Buildings*, vol. 95, pp. 39-46, 2015.
- [203] A. Alongi, R. Scoccia, M. Motta and L. Mazzarella, "Numerical investigation of the Castle of Zena energy needs and a feasibility study for the implementation of electric and gas driven heat pump," *Energy and Buildings*, vol. 95, pp. 32-38, 2015.
- [204] A. L. Pisello, A. Petrozzi, V. L. Castaldo and F. Cotana, "On an innovative integrated technique for energy refurbishment of historical buildings: Thermal-energy, economic and environmental analysis of a case study," *Applied Energy*, vol. 162, pp. 1313-1322, 2016.
- [205] L. Mauri, "Feasibility Analysis of Retrofit Strategies for the Achievement of NZEB Target on a Historic Building for Tertiary Use," *Energy Procedia*, vol. 101, pp. 1127-1134, 2016.
- [206] A. Magrini, L. Gobbi and F. d'Ambrosio, "Energy Audit of Public Buildings: The Energy Consumption of a University with Modern and Historical Buildings. Some Results," *Energy Procedia*, vol. 101, pp. 169-175, 2016.
- [207] B. Nastasi and U. Di Matteo, "Innovative Use of Hydrogen in Energy Retrofitting of Listed Buildings," *Energy Procedia*, vol. 111, pp. 435-441, 2017.
- [208] R. Hanna, "Environmental appraisal of historic buildings in Scotland the case study of the Glasgow School of Art," *Building and Environment*, vol. 37, pp. 1-10, 2002.
- [209] L. de Santoli, F. Fraticelli, F. Fornari and C. Calice, "Energy performance assessment and a retrofit strategies in public school buildings in Rome," *Energy and Buildings*, Vols. 68,

Part A, pp. 196-202, 2014.

- [210] M. Tahsildoost and Z. S. Zomorodian, "Energy retrofit techniques: An experimental study of two typical school buildings in Tehran," *Energy and Buildings*, vol. 104, pp. 65-72, 2015.
- [211] C. Marinosci, G. L. Morini, G. Semprini and M. Garai, "Preliminary Energy Audit of the Historical Building of the School of Engineering and Architecture of Bologna," *Energy Procedia*, vol. 81, pp. 64-73, 2015.
- [212] G. Semprini, C. Marinosci, A. Ferrante, G. Predari, G. Mochi, M. Garai and R. Gulli, "Energy management in public institutional and educational buildings: The case of the school of engineering and architecture in Bologna," *Energy and Buildings*, vol. 126, pp. 365-374, 2016.
- [213] G. Salvalai, L. E. Malighetti, L. Luchini and S. Girola, "Analysis of different energy conservation strategies on existing school buildings in a Pre-Alpine Region," *Energy and Buildings*, vol. 145, pp. 92-106, 2017.
- [214] Y. Yoshida, Y. Shimoda and T. Ohashi, "Strategies for a sustainable campus in Osaka University," *Energy and Buildings*, vol. 147, pp. 1-8, 2017.
- [215] K. Buvik, G. Andersen and S. Tangen, "Energy Upgrading of a Historical School Building in Cold Climate," *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 3342-3347, 2015.
- [216] P. Lassandro, T. Cosola and A. Tundo, "School Building Heritage: Energy Efficiency, Thermal and Lighting Comfort Evaluation Via Virtual Tour," *Energy and Buildings*, vol. 78, pp. 3168-3173, 2015.
- [217] S. S. Korsavi, Z. S. Zomorodian and M. Tahsildoost, "Visual comfort assessment of daylight and sunlit areas: A longitudinal field survey in classrooms in Kashan, Iran," *Energy and Buildings*, vol. 128, pp. 305-318, 2016.
- [218] M. Ghasempourabadi, A. Arshadi, A. Ghaedi and S. Shahri, "High-Performance Renovation of Iranian Historical Buildings to Substitute Active Lighting Systems with Natural Light (Case Study: Shahi Bank, Tehran)," *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 777-781, 2015.
- [219] G. Ciampi, A. Rosato, M. Scorpio and S. Sibilio, "Daylighting Contribution for Energy Saving in a Historical Building," *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 1257-1262, 2015.
- [220] S. N. Kamaruzzaman, R. Edwards, E. M. A. Zawawi and A. I. Che-Ani, "Achieving energy and cost savings through simple daylighting control in tropical historic buildings,"

Energy and Buildings, vol. 90, pp. 85-93, 2015.

- [221] M. M. AboulNaga and Y. H. Elsheshtawy, "Environmental sustainability assessment of buildings in hot climates: the case of the UAE," *Renewable Energy*, vol. 24, pp. 553-563.
- [222] P. Nunes, M. M. Lerer and G. C. da Graça, "Energy certification of existing office buildings: Analysis of two case studies and qualitative reflection," *Sustainable Cities and Society*, vol. 9, pp. 81-95, 2013.
- [223] H. Ma, N. Du, S. Yu, W. Lu, Z. Zhang, N. Deng and C. Li, "Analysis of typical public building energy consumption in northern China," *Energy and Buildings*, vol. 136, pp. 139-150, 2017.
- [224] A. M. Elharidia, P. G. Tuohya, M. A. Teamahb and A. A. Hanafy, "Energy and indoor environmental performance of typical Egyptian offices: Survey, baseline model and uncertainties," *Energy and Buildings*, vol. 135, pp. 367-384, 2017.
- [225] D. Bakonyi and G. Dobszay, "Simulation aided optimization of a historic window's refurbishment," *Energy and Buildings*, vol. 126, pp. 51-69, 2016.
- [226] C. D. Şahin, Z. D. Arsan, S. S. Tunçoku, T. Broström and G. G. Akkurt, "A transdisciplinary approach on the energy efficient retrofitting of a historic building in the Aegean Region of Turkey," *Energy and Buildings*, vol. 96, pp. 128-139, 2015.
- [227] R. Forgiarini Rupp and E. Ghisi, "Predicting thermal comfort in office buildings in a Brazilian temperate and humid climate," *Energy and Buildings*, vol. 144, pp. 152-166, 2017.
- [228] A. Belleri, M. Avantiaggiato and R. Lollini, "Ventilative Cooling in Shopping Centers' Retrofit: The Mercado Del Val Case Study," *Energy Procedia*, vol. 111, p. 669 – 677, 2017.
- [229] S. A. Ghita and T. Catalina, "Energy efficiency versus indoor environmental quality in different Romanian countryside schools," *Energy and Buildings*, vol. 92, pp. 140-154, 2015.
- [230] D. Camuffo, E. Pagan, S. Rissanen, Ł. Bratasz, R. Kozłowski, M. Camuffo and A. della Valle, "An advanced church heating system favourable to artworks: A contribution to European standardisation," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 11, pp. 205-219, 2010.
- [231] D. D' Agostino, P. M. Congedo and R. Cataldo, "Ventilation control using computational fluid-dynamics (CFD) modelling for cultural buildings conservation," *Procedia Chemistry*, vol. 8, pp. 83-91, 2013.

- [232] D. D'Agostino and P. M. Congedo, "CFD modeling and moisture dynamics implications of ventilation," *Building and Environment*, vol. 79, pp. 181-193, 2014.
- [233] K. Maroy, M. Steeman, L. De Backer, A. Janssens and M. De Paepe, "Conservation Climate Analysis of a Church Containing Valuable Artworks," *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 1269-1274, 2015.
- [234] S. M. Pinilla, D. V. Molini, A. Á. Fernández-Balbuena, G. H. Raboso, J. A. Herráez, M. Azcutia and Á. G. Botella, "Advanced daylighting evaluation applied to cultural heritage buildings and museums: Application to the cloister of Santa Maria El Paular," *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 1362-1370, 2016.
- [235] A. C. Iñigo and S. Vicente-Tavera, "Different degrees of stone decay on the inner and outer walls of a Cloister," *Building and Environment*, vol. 36, pp. 911-917, 2001.
- [236] N. Cardinale and F. Ruggiero, "A case study on the environmental measures techniques for the conservation in the vernacular settlements in Southern Italy," *Building and Environment*, vol. 37, pp. 405-414, 2002.
- [237] H. E. Silva and F. M. A. Henriques, "Preventive conservation of historic buildings in temperate climates. The importance of a risk-based analysis on the decision-making process," *Energy and Buildings*, vol. 107, pp. 26-36, 2015.
- [238] L. Tazky and A. Sedlakova, "Design of the Ventilated Air Channel to Resolve Moisture Problems in the Historical Church," *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 1323-1328, 2015.
- [239] C. M. Muñoz-González, A. L. León-Rodríguez and J. Navarro-Casas, "Air conditioning and passive environmental techniques in historic churches in Mediterranean climate," *Energy and Buildings*, vol. 130, pp. 567-577, 2016.
- [240] B. İpekoglu, H. Böke and Ö. Çizer, "Assessment of material use in relation to climate in historical buildings," *Building and Environment*, vol. 42, pp. 970-978, 2007.
- [241] M. J. Varas-Muriel, M. I. Martínez-Garrido and R. Fort, "Monitoring the thermal-hygrometric conditions induced by traditional heating systems in a historic Spanish church (12th-16th C)," *Energy and Buildings*, vol. 75, pp. 119-132, 2014.
- [242] M. Napp and T. Kalamees, "Energy use and indoor climate of conservation heating, dehumidification and adaptive ventilation for the climate control of a mediaeval church in a cold cl," *Energy and Buildings*, vol. 108, pp. 61-71, 2015.
- [243] M. Napp, . Wessberg, . Kalamees and . Broström, "Adaptive ventilation for climate control in a medieval church in cold climate," *International Journal of Ventilation*, vol.

15, no. 1, pp. 1-14, 2016.

- [244] N. Aste, S. Della Torre, R. S. Adhikari, M. Buzzetti, C. Del Pero, F. Leonforte and M. Manfren, "Sustainable church heating: The Basilica di Collemaggio case-study," *Energy and Buildings*, vol. 116, pp. 218-231, 2016.
- [245] A. Petrozzi, G. Cavalaglio, V. Coccia, A. Nicolini, M. Barbanera and F. Cotana, "Energy Enhancement of the Residues from the Cardoon Seeds Milling: Preliminary Experimentation in a Small Size Biogas Plant," *Energy Procedia*, vol. 101, pp. 440-447, 2016.
- [246] G. N. Tiwari, N. Lugani, A. K. Singh and H. P. Garg, "Performance studies of a passively cooled mahal," *Energy and Buildings*, vol. 22, pp. 91-99, 1995.
- [247] M. I. Martínez-Garrido, S. Aparicio, R. Fort, J. J. Anaya and M. A. G. Izquierdo, "Effect of solar radiation and humidity on the inner core of walls in historic buildings," *Construction and Building Materials*, vol. 51, pp. 383-394, 2014.
- [248] A. Hayati, M. Mattsson and M. Sandberg, "Single-sided ventilation through external doors Measurements and model evaluation in five historical churches," *Energy and Buildings*, vol. 141, pp. 114-124, 2017.
- [249] P. Zitek and T. Vyhlídal, "Model-based moisture sorption stabilization in historical buildings," *Building and Environment*, vol. 44, pp. 1181-1187, 2008.
- [250] T. Cardinale, D. Colapietro, N. Cardinale and F. Fatiguso, "Evaluation of the efficacy of traditional recovery interventions in historical buildings. A new selection methodology," *Energy Procedia*, vol. 40, pp. 515-524, 2013.
- [251] H. E. Silva and F. M. A. Henriques, "Microclimatic analysis of historic buildings: A new methodology for temperate climates," *Building and Environment*, vol. 82, pp. 381-387, 2014.
- [252] A. M. T. Martins and J. S. Carlos, "The retrofitting of the Bernardas' Convent in Lisbon," *Energy and Buildings*, vol. 68, pp. 396-402, 2014.
- [253] K. Gysels, F. Delalieux, F. Deutsch, R. Van Grieken, D. Camuffo, A. Bernardi, G. Sturaro, A. J. Busse and M. Wieser, "Indoor environment and conservation in the Royal Museum of Fine Arts, Antwerp, Belgium," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 5, pp. 221-230, 2004.
- [254] K. Fabbri and M. Pretelli, "Heritage buildings and historic microclimate without HVAC technology: Malatestiana Library in Cesena, Italy, UNESCO Memory of the World," *Energy and Buildings*, vol. 76, pp. 15-31, 2014.

- [255] C. Balocco, G. Petrone, O. Maggi, G. Pasquariello, R. Albertini and C. Pasquarella, "Indoor microclimatic study for Cultural Heritage protection and preventive conservation in the Palatina Library," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 22, pp. 956-967, 2016.
- [256] S. López-Aparicio, J. Smolík, L. Mašková, M. Součková, T. Grøntoft, L. Ondráčková and J. Stankiewicz, "Relationship of indoor and outdoor air pollutants in a naturally ventilated historical building envelope," *Building and Environment*, vol. 46, pp. 1460-1468, 2011.
- [257] K. A. Papakonstantinou, C. T. Kiranoudis and N. C. Markatos, "Mathematical modeling of environmental conditions inside historical buildings. The case of the archaeological museum of Athens," *Energy and Buildings*, vol. 31, pp. 211-220, 2000.
- [258] A. M. Papadopoulos, A. Avgelis and M. Santamouris, "Energy study of a medieval tower, restored as a museum," *Energy and Buildings*, vol. 35, pp. 951-961, 2003.
- [259] C. Balocco and R. Calzolari, "Natural light design for an ancient building A case study," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 9, pp. 172-178, 2008.
- [260] R. Farreny, J. Oliver-Solà, S. Escuder-Bonilla, M. Roca-Martí, E. Seigné, X. Gabarrell and J. Rieradevall, "The metabolism of cultural services. Energy and water flows in museums," *Energy and Buildings*, vol. 47, pp. 98-106, 2012.
- [261] L. de Santoli, F. Mancini, S. Rossetti and B. Nastasi, "Energy and system renovation plan for Galleria Borghese, Rome," *Energy and Buildings*, vol. 129, pp. 549-562, 2016.
- [262] R. P. Kramer, H. L. Schellen and A. W. M. van Schijndel, "Impact of ASHRAE's museum climate classes on energy consumption and indoor climate fluctuations: Full-scale measurements in museum Hermitage Amsterdam," *Energy and Buildings*, vol. 130, pp. 286-294, 2016.
- [263] F. Wang, K. Pichetwattana, R. Hendry and R. Galbraith, "Thermal performance of a gallery and refurbishment solutions," *Energy and Buildings*, vol. 71, pp. 38-52, 2014.
- [264] G. Litti, S. Khoshdel, A. Audenaert and J. Braet, "Hygrothermal performance evaluation of traditional brick masonry in historic buildings," *Energy and Buildings*, vol. 105, pp. 393-411, 2015.
- [265] E. Lucchi, "Multidisciplinary risk-based analysis for supporting the decision making process on conservation, energy efficiency, and human comfort in museum building," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 22, pp. 1079-1089, 2016.
- [266] E. Lucchi, "Simplified assessment method for environmental and energy quality in museum buildings," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 117, pp. 216-229, 2016.

- [267] F. Sciarpi, C. Carletti, G. Cellai and L. Pierangioli, "Environmental monitoring and microclimatic control strategies in "La Specola" museum of Florence," *Energy and Buildings*, vol. 95, pp. 190-201, 2015.
- [268] M. Rota, S. P. Corgnati and L. Di Corato, "The museum in historical buildings: Energy and systems. The project of the Fondazione Musei Senesi," *Energy and Buildings*, vol. 95, pp. 138-143, 2015.
- [269] S. Raffler, S. Bichlmair and R. Kilian, "Mounting of sensors on surfaces in historic buildings," *Energy and Buildings*, vol. 95, pp. 92-97, 2015.
- [270] A. Maahsen-Milan and M. Simonetti, "Auditoria and public halls. The preserved architectonic heritage, in the perspective of sustainability.," *Procedia Engineering*, vol. 21, pp. 711-720, 2011.
- [271] P. Ricciardi and C. Buratt, "Thermal comfort in the Frascini theatre (Pavia, Italy): Correlation between data from questionnaires, measurements, and mathematical model," *Energy and Buildings*, vol. 99, pp. 243-252, 2015.
- [272] C. Ratti, D. Raydan and K. Steemers, "Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate," *Energy and Buildings*, vol. 35, pp. 49-59, 2003.
- [273] C. S. P. López, M. Sala, L. C. Tagliabue, F. Frontini and S. Bouziri, "Solar Radiation and Daylighting Assessment Using the Sky-view Factor (SVF) Analysis as Method to Evaluate Urban Planning Densification Policies Impacts," *Energy Procedia*, vol. 91, pp. 989-996, 2016.
- [274] L. Tang, M. Nikolopoulou and N. Zhang, "Bioclimatic design of historic villages in central-western regions of China," *Energy and Buildings*, vol. 70, pp. 271-278, 2014.
- [275] A. Salvati, H. Coch Roura and C. Cecere, "Assessing the urban heat island and its energy impact on residential buildings in Mediterranean climate: Barcelona case study," *Energy and Buildings*, vol. 146, pp. 38-54, 2017.
- [276] C. Becchio, D. G. Ferrando, E. Fregonara, N. Milani, C. Quercia and V. Serra, "The cost-optimal methodology for the energy retrofit of an ex-industrial building located in Northern Italy," *Energy and Buildings*, vol. 127, pp. 590-602, 2016.
- [277] A. Alsabry, "Possibilities of decreasing energy consumption through thermal upgrading in selected buildings in Poland case study: The town of Zielona Góra," *Energy and Buildings*, vol. 130, p. 811-820, 2016.
- [278] J. Zagorskas, E. K. Zavadskas, Z. Turskis, M. Burinskienė, A. Blumberga and D.

- Blumberga, "Thermal insulation alternatives of historic brick buildings in Baltic Sea Region," *Energy and Buildings*, vol. 78, pp. 35-42, 2014.
- [279] P. Johansson, S. Geving, C. E. Hagentoft, B. P. Jelle, E. Rognvik, A. S. Kalagasidis and B. Time, "Interior insulation retrofit of a historical brick wall using vacuum insulation panels: Hygrothermal numerical simulations and laboratory investigations," *Building and Environment*, vol. 79, pp. 31-45, 2014.
- [280] A. V. Alp, "Vernacular climate control in desert architecture," *Energy and Buildings*, vol. 16, pp. 809-815, 1991.
- [281] B. Kırbaş and N. Hızlı, "Learning from Vernacular Architecture: Ecological Solutions in Traditional Erzurum Houses," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 216, pp. 788-799, 2016.
- [282] O. A. M. Bayoumi, "Nubian Vernacular architecture & contemporary Aswan buildings' enhancement," *Alexandria Engineering Journal (Article in press)*, 2017.
- [283] H. Al-Hinai, W. Batty and S. Prober, "Vernacular architecture of Oman: Features that enhance thermal comfort achieved within buildings," *Applied Energy*, vol. 44, pp. 233-244, 1993.
- [284] K. Kimura, "Vernacular technologies applied to modern architecture," *Renewable Energy*, vol. 5, pp. 900-907, 1994.
- [285] P. J. Godwin, "Building Conservation and Sustainability in the United Kingdom," *Procedia Engineering*, vol. 20, pp. 12-21, 2011.
- [286] H. K. Yung and H. W. Chan, "Implementation challenges to the adaptive reuse of heritage buildings: Towards the goals of sustainable, low carbon cities," *Habitat International*, vol. 36, pp. 352-361, 2012.
- [287] L. de Santoli, "Reprint of "Guidelines on energy efficiency of cultural heritage"," *Energy and Buildings*, vol. 95, pp. 2-8, 2015.
- [288] K. Kass, A. Blumberga and G. Zogla, "Energy Performance of Historical Brick Buildings in Northern Climate Zone," *Energy Procedia*, vol. 72, pp. 238-244, 2015.
- [289] K. Kass, A. Blumberga, D. Blumberga, G. Zogla, A. Kamenders and E. Kamendere, "Pre-assessment Method for Historic Building Stock Renovation Evaluation," *Energy Procedia*, vol. 113, pp. 346-353, 2017.
- [290] A. Blumberga, K. Kass and E. Kamendere, "A review on Latvian Historical Building

- Stock with Heavy Walls," *Energy Procedia*, vol. 95, pp. 17-21, 2016.
- [291] E. Grinzato, P. G. Bison and S. Marinetti, "Monitoring of ancient buildings by the thermal method," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 3, pp. 21-29, 2002.
- [292] M. Abuku, H. Janssen and S. Roels, "Impact of wind-driven rain on historic brick wall buildings in a moderately cold and humid climate: Numerical analyses of mould growth risk, indoor climate and energy consumpti," *Energy and Buildings*, vol. 41, pp. 101-110, 2009.
- [293] E. Marra, D. Zirkelbach and H. M. Künzel, "Prediction of Steel Corrosion in Porous Building Materials by Means of a New Hygrothermal Model," *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 1299-1304, 2015.
- [294] I. Sobhy, A. Brakez and B. Benhamou, "Energy performance and economic study of a solar floor heating system for a Hammam," *Energy and Buildings*, vol. 141, pp. 247-261, 2017.
- [295] G. S. Brager and R. J. de Dear, "Thermal adaptation in the built environment: a literature review," *Energy and Buildings*, pp. 83-96, 1998.
- [296] S. N. Kamaruzzaman, C. O. Egbu, E. M. Ahmad Zawawi, A. Shah Ali and A. Che-Ani, "The effect of indoor environmental quality on occupants' perception of performance: A case study of refurbished historic buildings in Malaysia," *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 2-3, pp. 407-413, 2010.
- [297] P. N. de Freitas and M. C. Guedes, "The use of windows as environmental control in "Baixa Pombalina's" heritage buildings," *Renewable Energy*, vol. 73, pp. 92-98, 2015.
- [298] N. Kampelis, K. Gobakis, V. Vagias, D. Kolokotsa, L. Standardi, D. Isidori, C. Cristalli, F. M. Montagnino, F. Paredes, P. Muratore, L. Venezia, M. Kyprianou Dracou, A. Montonen, A. Pyrgou, T. Karlessi and M. Santamouris, "Evaluation of the performance gap in industrial, residential & tertiary near-Zero energy buildings," *Energy and Buildings*, vol. 148, pp. 58-73, 2017.
- [299] S. Lagüela, J. Martínez, J. Armesto and P. Arias, "Energy efficiency studies through 3D laser scanning and thermographic technologies," *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 6, pp. 1216-1221, 2011.
- [300] K. Fabbri, M. Zuppiroli and K. Ambrogio, "Heritage buildings and energy performance: Mapping with GIS tools," *Energy and Buildings*, vol. 48, pp. 137-145, 2012.
- [301] Z. Wu and J. Xu, "Predicting and optimization of energy consumption using system

- dynamics-fuzzy multiple objective programming in world heritage areas," *Energy*, vol. 49, pp. 19-31, 2013.
- [302] N. Ginks and B. Painter, "Energy retrofit interventions in historic buildings: Exploring guidance and attitudes of conservation professionals to slim double glazing in the UK," *Energy and Buildings*, vol. 149, pp. 391-399, 2017.
- [303] L. Pampuri, N. Cereghetti, P. Galbani Bianchi and P. Caputo, "Evaluation of the space heating need in residential buildings at territorial scale: The case of Canton Ticino," *Energy and Buildings*, vol. 148, pp. 218-227, 2017.
- [304] E. Lucchi, "Thermal transmittance of historical brick masonries: A comparison among standard data, analytical calculation procedures, and in situ heat flow meter measur," *Energy and Buildings*, vol. 134, pp. 171-184, 2017.
- [305] M. Sibley and M. Sibley, "Hybrid Green Technologies for Retrofitting Heritage Buildings in North African Medinas: Combining Vernacular and High:tech Solutions for an Innovative Solar Powered Lighting System," *Energy Procedia*, vol. 42, pp. 718-725, 2013.
- [306] R. Ward and R. Choudhary, "A bottom-up energy analysis across a diverse urban building portfolio: retrofits for the buildings at the Royal Botanic Gardens, Kew, UK," *Building and Environment*, vol. 74, pp. 132-148, 2014.
- [307] M. Krarti, "Evaluation of large scale building energy efficiency retrofit program in Kuwait," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 50, p. 1069–1080, 2015.
- [308] A. G. González, M. Á. Gómez Zotano, W. Swan, P. Bouillard and H. Elkadi, "Maturity Matrix Assessment: Evaluation of Energy Efficiency Strategies in Brussels Historic Residential Stock," *Energy Procedia*, vol. 111, pp. 407-416, 2016.
- [309] A. Monaco, *La Casa Mediterranea. Modelli e deformazioni*, Napoli: Quaderni Isam, Edizioni Magma, 1997.
- [310] E. Turri, *Antropologia del Paesaggio*, Marsilio Editori: Venezia, 1974.
- [311] G. M. (. c. di), *Paesaggi d'architettura mediterranea*, La Spezia: Agorà, 2003.
- [312] A. Picone, *La casa araba d'egitto. Costruire con il clima. Dal vernacolo ai maestri contemporanei.*, Jacabook, 2009.
- [313] H. Fathy, *Natural Energy and Vernacular Architecture. Principles and Examples with Reference to Hot Arid Climates*, The University of Chicago Press , 1986.

- [314] J. May and A. Reid, *Architettura senza architetti. Guida alle costruzioni spontanee di tutto il mondo*, Rizzoli, 2010.
- [315] Erone di Alessandria, "Gli artificiosi, e curiosi moti spiritali di Herone. Tradotti da m. Gio. Battista Aleotti d'Argenta," [Online]. Available: <http://books.google.com>.
- [316] C. Balocco, F. Farneti and G. Minutoli, *I sistemi di ventilazione naturale negli edifici storici: Palazzo Pitti a Firenze e Palazzo Marchese a Palermo*, Firenze: Alinea, 2009.
- [317] M. Grosso, *Il raffrescamento passivo degli edifici in zone a clima temperato*, Milano: Maggioli Editore, 2011.
- [318] F. Allard and M. Santamouris, *Natural ventilation in buildings*, London: James & James, 1998.
- [319] M. Kolokotroni and P. Heiselberg, "Ventilative cooling. State of the art review," *IEA EBC Programme*, vol. Annex 62, 2015.
- [320] G. Chiesa and M. Grosso, "Geo-climatic applicability of natural ventilative cooling in the Mediterranean area," *Energy and Building*, vol. 107, pp. 376-391, 2015.
- [321] L. Pastore, R. Corrao and P. K. Heiselberg, "The effects of vegetation on indoor thermal comfort: The application of a multi-scale simulation methodology on a residential neighborhood renovation case study," *Energy and Buildings*, vol. 146, pp. 1-11, 2017.
- [322] G. Battista and E. M. Pastore, "Using Cool Pavements to Mitigate Urban Temperatures in a Case Study of Rome (Italy)," *Energy Procedia*, vol. 113, pp. 98-103, 2017.
- [323] G. Battista, E. Carnielo and R. De Lieto Vollaro, "Thermal impact of a redeveloped area on localized urban microclimate: A case study in Rome," *Energy and Buildings*, vol. 133, pp. 446-454, 2016.
- [324] G. Chiesa, M. Grosso, D. Pearlmutter and R. S., "Advances in Adaptive Comfort Modelling and Passive/Hybrid Cooling of buildings," *Energy and Buildings*, vol. 148, pp. 211-217, 2017.
- [325] G. Chiesa and M. Grosso, "Breakthrough of natural and hybrid ventilative cooling technologies: models and simulations," *International Journal of Ventilation*, vol. 15, no. 3-4, pp. 183-185, 2016.
- [326] G. Chiesa and M. Grosso, "Breakthrough of natural and hybrid ventilative cooling technologies: strategies, applications and case studies," *International Journal of Ventilation*, vol. 16, no. 2, pp. 81-83, 2017.

- [327] ASHRAE, Handbook - Thermal Storage, cap. 33, pag. 404-405, Atlanta, GA: Inch-Pound Edition, 1999.
- [328] C. Di Perna, F. Stazi, A. Ursini Casalena and M. D'Orazio, "Influence of the internal inertia of the building envelope on summertime comfort in buildings with high internal heat loads," *Energy and Buildings*, vol. 43, pp. 200-206, 2011.
- [329] M. Grimaudo and C. Tonelli, "Timber buildings and thermal inertia: Open scientific problems for summer behavior in Mediterranean climate," *Energy and Buildings*, vol. 83, pp. 89-95, 2014.
- [330] 7730 UNI-EN-ISO, *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.
- [331] F. Nicol, M. Humphreys and S. Roaf, Adaptive thermal comfort, principles and practice, Abingdon, UK: Routledge, 2012.
- [332] CEN Standard EN15251, *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings- addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*, 2007.
- [333] M. Pellegrino, M. Simonetti and G. Chiesa, "Reducing thermal discomfort and energy consumption of Indian residential buildings: Model validation by in-field measurements and simulation of low-cost interventions," *Energy and Buildings*, vol. 113, pp. 145-158, 2016.
- [334] M. A. Humphreys, "A simple theoretical derivation of thermal comfort," *Journal of the Institute of Heating and Ventilating*, p. 95-98, 1970.
- [335] F. Nicol, "Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics," *Energy and Buildings*, vol. 36, pp. 628-637, 2004.
- [336] ASHRAE, Handbook - Energy Estimating and Modeling Methods, cap. 19, pag. 491-496, Atlanta, GA: Inch-Pound Edition, 2009.
- [337] ASHRAE, Handbook - Indoor environmental modeling, cap. 13, pag. 252-274, Atlanta, GA, 2009.
- [338] M. E. Gurtin, An introduction to Continuum Mechanics, Cambridge, MA: Academic Press, 1981.
- [339] EnergyPlus Engineering Reference, "The Reference to EnergyPlus Calculations," 2015.

- [Online]. Available:
https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs_v8.3.0/EngineeringReference.pdf.
- [340] G. P. Mitalas and D. G. Stephenson, "Room thermal response factors," *Research Paper n. 342 of the division of the Building Research, Ottawa*, 1967.
- [341] J. E. Seem, *Ph.D. Thesis*, Madison, WI: University of Wisconsin, 1987.
- [342] J. Tritton, *Physical Fluid Dynamics*, UK: Oxford Science Publication, 1988.
- [343] G. Salerno, L. Teresi, C. Tonelli and V. Vitale, "Numerical modelling of structural cooling in Mediterranean climate," *International Journal of Ventilation*, vol. 15, no. 3-4, pp. 302-319, 2016.
- [344] ASHRAE, *Handbook*, Atlanta, 1993.
- [345] V. Vitale and G. Salerno, "A numerical prediction of the passive cooling effects on thermal comfort for a historical building in Rome," *Energy and Building*, vol. 157, pp. 1-10, 2017.
- [346] G. Ersoch, *Roma: il mattatoio e mercato del bestiame costruiti dal comune negli anni 1888-1891: descrizione e disegni/con progetto e direzione di Gioacchino Ersoch*, Roma: Regio Stabilimento Litografico Cartografico C. Virano e C., 1891.
- [347] G. Franco, *Il Mattatoio di Testaccio a Roma. Costruzioni e trasformazioni del complesso dismesso*, F. d. a. D. d. p. e. s. d. Università degli studi Roma tre, Ed., Roma: Edizioni Librerie Dedalo, 1998.
- [348] COMSOL Multiphysics 4.4. [Online]. Available: <http://www.comsol.com..>
- [349] J. P. Holman, *Heat Transfer - Tenth Edition*, New York: McGraw-Hill, 2010.
- [350] ASHRAE, *Handbook - Nonresidential Cooling and Heating Load Calculations*, cap. 18, pag. 427, Atlanta, GA, 2009.
- [351] ASHRAE, *Handbook - Nonresidential Cooling and Heating Load Calculations*, cap. 15, pag. 294, Atlanta, GA, 2009.
- [352] C. Wilkins and M. H. Hosni, "Heat gain from office equipment," *ASHRAE Journal*, pp. pag. 33-43, 2000.
- [353] NOAH's ark, 2003-2007. [Online]. Available:
http://ec.europa.eu/regional_policy/en/projects/germany/noahs-ark.
- [354] K. Fabbri, M. Zuppiroli and K. Ambrogio, "Heritage buildings and energy performance: Mapping with GIS tools," *Energy and Buildings*, 2012.

- [355] P. Keshtkaran, "Harmonization Between Climate and Architecture in Vernacular Heritage: A Case Study in Yazd, Iran," *Procedia Engineering*.
- [356] R. F. A. C. M. L. P. Principi, "Evaluation of energy conservation opportunities through Energy Performance Contracting: A case study in Italy," *Energy and Buildings*, 2016.
- [357] Y. Allab, M. Pellegrino, X. Guo, E. Nefzaoui and A. Kindinis, "Energy and comfort assessment in educational building: Case study in a French university campus," *Energy and Buildings*, vol. 143, pp. 202-219, 2017.
- [358] T. Niemelä, R. Kosonen and J. Jokisalo, "Cost-effectiveness of energy performance renovation measures in Finnish brick apartment buildings," *Energy and Buildings*, vol. 137, pp. 60-75, 2017.
- [359] J. Terés-Zubiaga, A. Campos-Celador, I. González-Pino and C. Escudero-Revilla, "Energy and economic assessment of the envelope retrofitting in residential buildings in Northern Spain," *Energy and Buildings*, vol. 86, pp. 194-202, 2015.
- [360] T. E. Morakinyo, K. W. D. Kalani, C. Dahanayake, O. B. Adegun and A. A. Balogun, "Modelling the effect of tree-shading on summer indoor and outdoor thermal condition of two similar buildings in a Nigerian university," *Energy and Buildings*, vol. 130, pp. 721-732, 2016.
- [361] S. Ostojić, Z. Veršić and I. Muraj, "Energy analysis and refurbishment strategy for Zagreb University buildings: Former Faculty of Technology in Zagreb by Alfred Albin," *Energy and Buildings*, vol. 115, pp. 47-54, 2016.
- [362] S. Benni, P. Tassinari, F. Bonora, A. Barbaresi and D. Torreggiani, "Efficacy of greenhouse natural ventilation: Environmental monitoring and CFD simulations of a study case," *Energy and Buildings*, vol. 125, pp. 276-286, 2016.
- [363] R. Jing, M. Wang, R. Zhang, N. Li and Y. Zhao, "A study on energy performance of 30 commercial office buildings in Hong Kong," *Energy and Buildings*, vol. 144, pp. 117-128, 2017.
- [364] O. Pombo, K. Allacker, B. Rivela and J. Neila, "Sustainability assessment of energy saving measures: A multi-criteria approach for residential buildings retrofitting-A case study of the Spanish housing stock," *Energy and Buildings*, vol. 116, pp. 384-394, 2016.
- [365] A. Passer, C. O. Plamondon, P. Kenneally, V. John and G. Habert, "The impact of future scenarios on building refurbishment strategies towards plus energy buildings," *Energy and Buildings*, vol. 124, pp. 153-163, 2016.

- [366] L. Pagliano, S. Carlucci, F. Causone, A. Moazami and G. Cattarin, "Energy retrofit for a climate resilient child care centre," *Energy and Buildings*, vol. 127, pp. 1117-1132, 2016.
- [367] O. Irulegi, A. Ruiz-Pardo, A. Serra, J. M. Salmerón and R. Vega, "Retrofit strategies towards Net Zero Energy Educational Buildings: A case study at the University of the Basque Country," *Energy and Buildings*, vol. 144, pp. 387-400, 2017.
- [368] O. C. Mørck and A. J. Paulsen, "Energy saving technology screening within the EU-project "School of the Future"," *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 1482-1492, 2014.
- [369] M. Zinzi, S. Agnoli, G. Battistini and G. Bernabini, "Deep energy retrofit of the T. M. Plauto School in Italy-A five years experience," *Energy and Buildings*, vol. 126, pp. 239-251, 2016.
- [370] M. Schmidt, M. V. Moreno, A. Schülke, K. Macek, K. Mařík and A. G. Pastor, "Optimizing legacy building operation: The evolution into data-driven predictive cyber-physical systems," *Energy and Buildings*, vol. 148, pp. 257-279, 2017.
- [371] M. Sauchelli, G. Masera, G. D'Antona and G. Manzolini, "ISIS Facchinetti a nearly zero energy retrofit in Italy," *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 1326-1335, 2014.
- [372] M. Gustafsson, C. Dipasquale, S. Poppi, A. Bellini, R. Fedrizzi, C. Bales, F. Ochs, M. Sié and S. Holmberg, "Economic and environmental analysis of energy renovation packages for European office buildings," *Energy and Buildings*, vol. 148, pp. 155-165, 2017.
- [373] M. F. Silva, S. Maas, H. A. de Souza and A. Gomes, "Post-occupancy evaluation of residential buildings in Luxembourg with centralized and decentralized ventilation systems, focusing on indoor air quality (IAQ). Assessment by questionnaires and physical measurements," *Energy and Buildings*, vol. 148, pp. 119-127, 2017.
- [374] D. Matic, J. R. Calzada, M. Eric and M. Babin, "Economically feasible energy refurbishment of prefabricated building in Belgrade, Serbia," *Energy and Buildings*, vol. 98, pp. 74-81, 2015.
- [375] M. G. (. c. di), *Paesaggi d'architettura mediterranea*, La Spezia: Agorà, 2003.
- [376] L. Tang, M. Nikolopoulou, F. Zhao and N. Zhang, "CFD modeling of the built environment in Chinese historic settlements," *Energy and Buildings*, vol. 55, pp. 601-606, 2012.
- [377] L. Rong, D. Liu, E. F. Pedersen and G. Zhang, "The effect of wind speed and direction and surrounding maize on hybrid ventilation in a dairy cow building in Denmark," *Energy and Buildings*, vol. 86, pp. 25-34, 2015.

- [378] L. 2. a. 1. n. 310, 1964.
- [379] L. Di Pilla, G. Desogus, S. Mura, R. Ricciu and M. Di Francesco, "Optimizing the distribution of Italian building energy retrofit incentives with Linear Programming," *Energy and Buildings*, vol. 112, pp. 21-27, 2016.
- [380] S. Larbia and A. El Hellaa, "Thermo-fluid aspect analysis of passive cooling system case using solar chimney in the south regions of Algeria," *Energy Procedia*, vol. 36, pp. 628-637, 2013.
- [381] K. Sterflinger, J. Ettenauer and G. Piñar, "Bio-susceptibility of materials and thermal insulation systems used for historical buildings," *Energy Procedia*, vol. 40, pp. 499-506, 2013.
- [382] J. Santamaría, S. Girón and M. A. Campano, "Economic assessments of passive thermal rehabilitations of dwellings in Mediterranean climate," *Energy and Buildings*, vol. 784, p. 772, 2016.
- [383] J. Ortiz, A. Fonseca i Casas, J. Salom, N. Garrido Soriano and P. Fonseca i Casas, "Cost-effective analysis for selecting energy efficiency measures for refurbishment of residential buildings in Catalonia," *Energy and Buildings*, vol. 128, pp. 442-457, 2016.
- [384] N. Č. Ignjatović, D. Ignjatović and B. Stanković, "Possibilities for energy rehabilitation of typical single family house in Belgrade-Case study," *Energy and Buildings*, pp. 154-162, 2016.
- [385] H. Erhorn-Kluttig and H. Erhorn, "School of the Future : Towards zero emission with high performance indoor environment," *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 1468-1473, 2014.
- [386] G. Woroniak and J. Piotrowska-Woroniak, "Effects of pollution reduction and energy consumption reduction insmall churches in Drohiczyn community," *Energy and Buildings*, vol. 72, pp. 51-61, 2014.
- [387] G. Salvalai, M. M. Sesana and G. Iannaccone, "Deep renovation of multi-storey multi-owner existing residential buildings: A pilot case study in Italy," *Energy and Buildings*, vol. 148, pp. 23-36, 2017.
- [388] G. H. Building. [Online]. Available: <http://www.gbcitalia.org/historic-building>.
- [389] C. Gail, "Energy conservation in museums and historic buildings," *ASHRAE Journal*, vol. 25:8, 1983.
- [390] F. Stazi, F. Naspi, G. Ulpiani and C. Di Perna, "Indoor air quality and thermal comfort

optimization in classrooms developing an automatic system for windows opening and closing," *Energy and Buildings*, vol. 139, pp. 732-746, 2017.

- [391] F. Muhsin, W. F. M. Yusoff, M. F. Mohamed and A. R. Sopian, "CFD modeling of natural ventilation in a void connected to the living units of multi-storey housing for thermal comfort," *Energy and Buildings*, vol. 144, pp. 1-16, 2017.
- [392] G. Ficco, F. Iannetta, E. Ianniello and F. R. d'Ambros, "U-value in situ measurement for energy diagnosis of existing buildings," *Energy and Buildings*, vol. 104, pp. 108-121, 2015.
- [393] F. Ascione, N. Bianco, R. F. De Masi, G. M. Mauro and G. P. Vanoli, "Energy retrofit of educational buildings: Transient energy simulations, model calibration and multi-objective optimization towards nearly zero-energy performance," *Energy and Buildings*, vol. 144, pp. 313-319, 2017.
- [394] K. Fabbri, L. Tronchin and V. Tarabusi, "Energy retrofit and economic evaluation priorities applied at an Italian case study," *Energy Procedia*, vol. 45, pp. 379-384, 2014.
- [395] EN 15026, *Hygrothermal performance of building components and building elements*, 2007.
- [396] E. Kamendere, L. Grava, K. Zvaigznitis, A. Kamenders and A. Blumberga, "Properties of Bricks and Masonry of Historical Buildings as a Background for Safe Renovation Measures," *Energy Procedia*, vol. 95, pp. 119-123, 2016.
- [397] E. Barreira, R. M. S. F. Almeida and M. Moreira, "An infrared thermography passive approach to assess the effect of leakage points in buildings," *Energy and Buildings*, vol. 140, pp. 224-235, 2017.
- [398] C. Koo and T. Hong, "A dynamic energy performance curve for evaluating the historical trends in the energy performance of existing buildings using a simplified case-based reasoni," *Energy and Buildings*, vol. 92, pp. 338-350, 2015.
- [399] A. Bowen and R. Vagner , "The First International PLEA Conference," in *Passive and Low Energy Alternatives*, 1982.
- [400] A. Bowen and S. Yannas, "Proceedings of the Second International PLEA Conference," in *Proceedings of the Second International PLEA Conference*.
- [401] A. Boeri, E. Antonini, D. Longo and R. Roversi, "The Redevelopment of The Heritage of Social Housing in Italy: Survey and Assessment Instruments. The Case Study of Pilastro Neighborhood in Bologna," *Precedia Engineering*, vol. 21, pp. 997-1005, 2011.

- [402] B. Kossak and M. Stadler, "Adaptive thermal zone modeling including the storage mass of the building zone," *Energy and Buildings*, vol. 109, pp. 407-417, 2015.
- [403] A. Belleri and A. Marini, "Does seismic risk affect the environmental impact of existing buildings?," *Energy and Buildings*, vol. 110, pp. 149-158, 2016.
- [404] Autodesk Ecotect Analysis, 2011. [Online]. Available: <http://www.autodesk.it..>
- [405] A. Palladio, *Quattro Libri dell'Architettura*, Libro Primo, De'Cammini, Cap XXVII, 1570.
- [406] A. Moschella, A. Salemi, A. Lo Faro, G. Sanfilippo, M. Detommaso and A. Privitera, "Historic Buildings in Mediterranean Area and Solar Thermal Technologies: Architectural Integration vs Preservation Criteria," *Energy Procedia*, vol. 42, pp. 416-425, 2013.
- [407] A. Ahmed, M. M. Garcia, D. McGough and M. Gaterell, "Methodology for Evaluating Innovative Technologies for Low-Energy Retrofitting of Public Buildings," *Energy Procedia*, vol. 112, p. 166–175, 2017.
- [408] U. T. 11300-1, *Evaluate energy performance of buildings*, 2008.
- [409] ASHRAE, *Handbook - Nonresidential Cooling and Heating Load Calculations*, cap. 18, pag. 428 tab.15, Atlanta, 2009.
- [410] ASHRAE, *Handbook*, Atlanta, 1993.