



Università degli Studi Roma TRE

Dottorato di Ricerca in Ingegneria Meccanica ed Industriale

XXVIII Ciclo

*Studio di una metodologia per la determinazione delle
proprietà termiche equivalenti di pacchetti murari*

Tesi di dottorato di

ing. *Luca Evangelisti*

Tutor

Prof. *Roberto De Lieto Vollaro*

Coordinatore

Prof. *Edoardo Bemporad*

*A tutte le persone che mi hanno
sostenuto in questo percorso...*

Indice

<i>Abstract</i>	2
1. INTRODUZIONE	3
1.1 Generalità	3
1.2 Classificazione del panorama edilizio italiano	3
1.3 UNI TS 11300 - Brevi cenni	7
1.4 Codici di calcolo semplificati e dinamici	8
1.5 Analisi del comportamento energetico di una parete	11
2. INQUADRAMENTO SCIENTIFICO DEL PROBLEMA	16
3. METODOLOGIE UTILIZZATE	18
3.1 Confronto tra codici quasi-stazionari e codici dinamici	18
3.2 Calibrazione dei modelli	20
3.3 Campagne di misura sperimentali	21
3.3.1 Misure termoflussimetriche	21
3.3.2 Indagini termografiche	27
4. SVILUPPO DEL PROGETTO DI RICERCA	34
4.1 Prima fase del progetto di ricerca	34
4.2 Seconda fase del progetto di ricerca	43
4.3 Terza fase del progetto di ricerca	50
5. APPORTI INNOVATIVI	67
6. CONCLUSIONI	69
Riferimenti Bibliografici	70
Pubblicazioni ottenute durante la formazione dottorale	73

Abstract

Le informazioni sulle stratigrafie degli involucri edilizi vengono quasi sempre dedotte in base all'anno di costruzione dello stabile o sulla base delle proprietà termiche riportate all'interno di specifiche norme. Tali norme indicano valori di riferimento delle proprietà termiche dei materiali comunemente utilizzati in edilizia o valori di conduttanza per elementi disomogenei, i quali possono essere utilizzati solo quando si hanno informazioni certe sui materiali presenti all'interno delle pareti. La certezza del dato sussiste in costruzioni ex-novo, dove è possibile far riferimento alle schede tecniche dei materiali o è possibile far affidamento su documentazione tecnica attendibile. Oggi, si parla sempre più di efficienza energetica e tale concetto non può non essere connesso al panorama edilizio esistente, responsabile di oltre il 35% dei consumi totali di energia su scala italiana e globale. Capire le reali prestazioni di un edificio significa comprendere il reale comportamento delle sue parti strutturali. Nel caso delle superfici opache esiste l'esigenza di capire il reale comportamento dei pacchetti murari al fine di intervenire nel modo più opportuno. Tuttavia, non sempre è possibile conoscere l'effettiva composizione stratigrafica di una parete: ciò avviene quando non è possibile estrarre campioni di materiale o quando si ipotizza che ragioni costruttive abbiano modificato il progetto originario. Occorre quindi sottolineare che l'impossibilità di reperire informazioni attendibili da un lato e l'impiego di indagini strumentali che riguardano gli interi pacchetti murari dall'altro, fanno nascere la necessità di formalizzare un approccio metodologico utile per descrivere il comportamento dell'intera parete, superando così l'esigenza di informazioni relative ai singoli strati.

L'attività di ricerca svolta in questa tesi di dottorato riguarda la proposta di una metodologia per la stima dei parametri termici equivalenti di pacchetti murari, le cui stratigrafie sono sconosciute. Tale proposta nasce all'interno di un percorso che inizia con la comprensione delle prestazioni energetiche degli involucri edilizi attraverso strumenti di simulazione dinamica, passa attraverso il concetto di diagnosi energetica strumentale e sfocia in una rielaborazione degli stessi per dar vita ad un nuovo approccio metodologico.

Il metodo presentato porta con sé effetti pratici riguardanti la possibilità di individuare proprietà termiche fondamentali per quantificare il comportamento energetico degli edifici: si abbandonerebbe il concetto di trasmittanza termica stazionaria basata sulla sola conducibilità termica, lasciando il posto al concetto di diffusione del calore, che vede al suo interno la coesistenza di conducibilità termica, densità e calore specifico.

Conseguentemente, il metodo consente di migliorare l'accoppiamento edificio-impianto: tale concetto deriva da una più precisa stima delle prestazioni energetiche, con conseguenze dirette in termini di dimensionamento impiantistico, tenendo in conto fenomeni di accumulo termico.

Inoltre, il metodo proposto è un metodo non distruttivo: l'applicazione della strumentazione non prevede alcuna alterazione della parete, conservando in questo modo la totale funzionalità del pacchetto murario, con conseguenti vantaggi in termini di tempo e denaro.

È quindi possibile concludere che l'obiettivo che si è cercato di perseguire consiste nella definizione di un nuovo metodo diagnostico strumentale non distruttivo, caratterizzato essenzialmente da semplicità di utilizzo e fruibilità da parte di tutti, contraddistinto da molteplici implicazioni di natura pratica, con ripercussioni di natura economica ed ambientale.

1. Introduzione

1.1 Generalità

Gli aspetti energetici ricoprono sempre più un ruolo fondamentale nella realizzazione degli edifici. La complessità della raccolta dati per l'esecuzione di una simulazione dinamica del comportamento energetico di un edificio, ha condotto gli enti di normazione a definire procedure semplificate, passando da una valutazione su base oraria ad una valutazione energetica su base mensile. Tali procedure (definite "quasi-stazionarie") sono state trasposte in norme che richiedono semplificazioni metodologiche, quali quelle di derivazione CEN (Comitato Europeo di Normazione) e rappresentano il riferimento su cui si basano anche i decreti nazionali di recepimento della EPBD (Energy Performance of Buildings Directive), Direttiva UE sull'efficienza energetica degli edifici. Al momento, i software presenti sul mercato destinati alla certificazione energetica, così come quelli messi a disposizione da ITC-CNR (Istituto per le Tecnologie della Costruzione - Consiglio Nazionale delle Ricerche) o dalle singole Regioni, generano come output una serie di dati e di indicatori sulle prestazioni energetiche su base mensile. Questi strumenti hanno il vantaggio di essere agevolmente utilizzabili, ma non sono in grado di tenere debitamente in considerazione gli effetti delle variazioni climatiche rilevabili nell'arco delle 24 ore. Alcuni studi svolti negli Stati Uniti e in Spagna [1,2,3] hanno mostrato risultati connessi agli effetti che le procedure di calcolo semplificate e le valutazioni di tipo dinamico possono avere sul bilancio energetico dell'edificio. Le ricerche rivelano come gli approcci semplificati siano poco sensibili nell'apprezzare gli effetti della capacità termica delle masse murarie nel rispondere alla variabilità delle condizioni ambientali. Spostandosi da questi risultati, ottenuti nell'ambito di ricerche eseguite al Politecnico di Milano, si è voluto verificare quale ruolo avesse, in termini di efficacia prestazionale, la capacità termica dell'involucro edilizio, a parità delle restanti soluzioni costruttive adottate (partizioni verticali interne e solai) [4,5,6]. La sensibilità del codice di calcolo dinamico ha diagnosticato differenze prestazionali importanti in presenza di un involucro edilizio massivo, sia per quanto riguarda il fabbisogno di energia termica invernale che estiva.

1.2 Classificazione del panorama edilizio italiano

Il panorama edilizio italiano è particolarmente "*vecchio*", con circa due terzi degli edifici esistenti costruiti prima del 1973 (anno in cui è stato emesso il primo regolamento riguardo il risparmio energetico nelle costruzioni). La realizzazione di nuove costruzioni residenziali incide per circa l'1% rispetto all'edilizia esistente. Di questa, circa i 2/3 hanno un consumo stimato in media tra i 200 e i 250 kWh/m², mentre il restante 1/3 consuma circa 150 kWh/m². Conseguentemente, per intervenire in modo decisivo nell'abbattimento dei consumi è necessario riqualificare gli edifici esistenti. Con riferimento al calcolo dei fabbisogni energetici, è evidente che uno dei primi interventi che occorre effettuare per l'abbattimento dei consumi delle abitazioni esistenti riguarda l'involucro edilizio, aumentando la sua capacità isolante e valutandone il comportamento inerziale onde evitare inutili interventi. Risanare un edificio risulta essere utile e vantaggioso. Il plusvalore che ne consegue

è determinato almeno da cinque punti: meno spese di riscaldamento, miglior comfort abitativo, salubrità degli ambienti, tutela del clima e dell'ambiente e, infine, aumento del valore dell'immobile. Le dispersioni termiche sono riconducibili alle pareti, al tetto, alle finestre e al solaio contro-terra o verso un volume non riscaldato. Indubbiamente, altro punto debole sono i ponti termici, spesso causa di umidità superficiale con conseguente apparizione di muffa. Il modo migliore per ridurre le dispersioni delle facciate e aumentare la qualità ambientale interna è l'applicazione di un cappotto esterno. Un punto importante d'intervento è il tetto, dove l'Italia si presenta all'ultimo posto per centimetri di isolante applicato. Mediamente le dispersioni dovute ad uno scarso (o in alcuni casi assente) isolamento della copertura incidono per circa il 20-25% di tutte le dispersioni dell'edificio. Risulta quindi evidente che in fase di riqualificazione è indispensabile prevedere un appropriato isolamento della copertura. È possibile calcolare facilmente che una riqualificazione energetica di un edificio esistente, intervenendo esclusivamente sull'involucro edilizio, consente di raggiungere un risparmio energetico fino a 2/3 del consumo precedente, con un notevole guadagno in termini economici futuri nonché di salubrità e comfort degli ambienti interni. Indubbiamente, gli interventi di riqualificazione energetica di edifici esistenti, a differenza delle realizzazioni *ex novo*, presentano una serie di difficoltà, sia progettuali sia realizzative, dovute fondamentalmente al fatto che ci sono vincoli da rispettare e compromessi da raggiungere.

Il miglioramento del patrimonio esistente in termini di efficienza energetica è una tematica urgente ed attuale, ad oggi sottovalutata anche dalla legislazione che tende ad agire con più incisività sull'edilizia di nuova costruzione. L'obiettivo voluto dall'Unione Europea di riduzione del 20% delle emissioni climalteranti rispetto ai livelli del 1990 e del consumo di energia del 20% rispetto ai livelli previsti per il 2020, oltre che di incremento dell'uso delle fonti rinnovabili per ottenere il 20% della produzione energetica totale, richiede una strategia integrata sul patrimonio edilizio esistente e di nuova costruzione.

Alcuni studi [16,17,18], infatti, hanno dimostrato che operare imponendo limiti di consumo solo alle nuove edificazioni non è sufficiente per raggiungere questi obiettivi. L'intervento di efficientamento degli edifici esistenti, in particolare nel caso di beni riconosciuti come appartenenti al patrimonio culturale, pone una questione di fondo legata ai rischi di una trasformazione che potrebbe portare ad una riduzione del valore materiale e immateriale dell'edificio.

C'è da aggiungere che la valutazione del comportamento energetico degli edifici storici è un tema non ancora interamente risolto, poiché gli strumenti e i criteri a disposizione del progettista sono pensati principalmente in funzione delle esigenze delle nuove costruzioni. Gli edifici antichi, invece, si basano su meccanismi fisici diversi in quanto l'assenza di impianti di climatizzazione e di illuminazione ha richiesto uno sfruttamento cosciente delle risorse naturali locali. Le costruzioni si adattano alle condizioni climatiche esterne grazie alla traspirabilità, alla resistenza e all'inerzia termica dell'involucro. Per tale motivo, le pareti dell'edilizia storica sono costruite con materiali reperibili localmente e dotati di una buona permeabilità al vapore e con stratigrafie di elevato spessore. L'aumento dello spessore, infatti, migliora le prestazioni di resistenza e di inerzia termica della parete (ovvero il tempo di sfasamento delle onde termiche e l'attenuazione delle stesse), garantendo buone condizioni di vivibilità e di benessere degli utenti nell'ambiente interno.

Il tema, ad oggi, è affrontato secondo ottiche diverse nella legislazione europea e nazionale, nelle misure di finanziamento degli interventi di riqualificazione, nelle ricerche scientifiche e nelle sperimentazioni pratiche.

Nel progetto sul costruito, la legislazione italiana impone di agire secondo un'ottica prescrittiva rivolta al singolo elemento tecnico, esaminando l'intervento di riqualificazione energetica come la somma di

singole azioni effettuate su parti poco efficienti. Questa logica può causare gravi problemi per la conservazione dell'immobile o delle sue parti, favorendo l'adeguamento prestazionale e la sostituzione dei singoli componenti (le finestre, i vetri, le pareti verticali, le coperture). L'esempio caratteristico è costituito dalla sostituzione delle finestre esistenti con sistemi più performanti, invece di mantenere il telaio esistente e di sostituire la sola superficie trasparente.

La definizione di edifici tipo, appartenenti ad una specifica area climatica ed utili a rappresentare una specifica dimensione edilizia all'interno di una data epoca di costruzione, può avvenire mediante tre diversi approcci metodologici [19]:

- *Primo approccio* – la definizione dell'edificio rappresentativo si basa sulla scelta operata in base all'esperienza. L'edificio tipo è selezionato all'interno di un dato contesto climatico come maggiormente rappresentativo di una specifica dimensione e di un'epoca di costruzione. Questo approccio può essere utilizzato in assenza di dati statistici.
- *Secondo approccio* – identifica l'edificio tipo mediante un'analisi statistica. I dati raccolti vengono elaborati al fine di individuare un edificio reale che abbia caratteristiche geometriche e costruttive corrispondenti con la media del campione di edifici analizzato.
- *Terzo approccio* – identifica l'edificio tipo come un archetipo che è definito come “a statistical composite of the features found within a category of buildings in the stock”. L'archetipo non è un edificio reale, ma un edificio virtuale caratterizzato da un insieme di proprietà individuate statisticamente all'interno di una categoria di edifici.

Ciascuno di questi approcci può essere applicato separatamente per definire l'edificio tipo nelle sue proprietà geometriche, da un lato, e nelle sue caratteristiche costruttive, dall'altro. L'insieme di edifici tipo costituisce una *matrice delle tipologie edilizie* (Figura 1). Tale matrice dovrebbe contenere tutte le tipologie costruttive italiane al fine di offrirne un quadro rappresentativo. All'interno della matrice si possono distinguere casi reali (fotografie) ed archetipi individuati mediante approccio teorico (disegni). Gli archetipi sono contraddistinti da proprietà dimensionali medie di un campione di edifici determinate mediante analisi statistica [19].

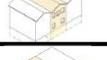
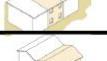
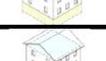
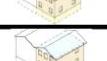
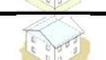
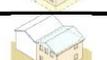
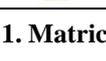
CLASSE DI DIMENSIONE EDILIZIA				
<i>Area climatica media</i>	CASE MONOFAMILIARI	CASE A SCHIERA	EDIFICI MULTIFAMILIARI	BLOCCHI DI APPARTAMENTI
1 Fino al 1900				
2 1901-1920				
3 1921-1945				
4 1946-1960				
5 1961-1975				
6 1976-1990				
7 1991-2005				
8 Dopo il 2005				

Figura 1. Matrice delle tipologie edilizie [19].

Per il progetto di ricerca, della matrice edilizia sono state esaminate solo alcune classi. Sono state analizzate strutture datate fino al 2000. In questo intervallo temporale gli edifici sono costituiti da elementi massivi (fino agli anni 60) e mattoni forati (a partire dagli anni 60) che richiedono l'impiego di codici di calcolo avanzati per la comprensione delle prestazioni energetiche. Risulta evidente come strutture massive siano caratterizzate da accumuli termici che incidono in modo rilevante sulla prestazione complessiva dell'edificio. È possibile affermare che le costruzioni italiane sono tipicamente massive, i cui materiali tradizionali che costituiscono i componenti edilizi sono laterizi e calcestruzzo. Il periodo di costruzione è fondamentale per capire il livello di isolamento termico. Dalla matrice delle tipologie edilizie è stato ricavato un insieme di interesse, riportato nella Tabella 2.

Tabella 2. Categorie oggetto di analisi.

Tipologie edilizie		Anno di costruzione
Case monofamiliari isolate	Case 2 piani	fino al 1900
		1901-1945
		1946-1960
		1961-1975
		1976-2000
Blocchi di appartamenti	Palazzine 5 piani	fino al 1900
		1901-1945
		1946-1960
	Palazzine 7 piani	1961-1975
		1976-2000

Sulla base delle informazioni contenute nella Tabella 2, è possibile utilizzare la norma UNI TS 11300 ed il *metodo tabellare*, attraverso il quale, nel caso in cui non sia possibile eseguire rilievi strumentali o reperire informazioni certe, è possibile considerare la classificazione riportata nella Tabella 3. In altre parole, stabilito l'anno di costruzione è possibile definire una stratigrafia tipica di quegli anni e associare, in base allo spessore dell'elemento considerato, un valore di trasmittanza termica (valore suggerito dalla norma stessa).

Tabella 3. Stratigrafie e trasmittanze di riferimento.

Periodo	Muratura esterna	Spessore complessivo [cm]	Trasmittanza termica [W/m ² K]
fino al 1900	Parete in tufo intonacata	40 - 60	1.26 - 0.90
1901-1945	Parete in mattoni pieni intonacata	40	1.39
1946-1960	Parete in mattoni pieni intonacata	40	1.39
1961-1975	Parete a cassa vuota con mattoni forati intonacata	30 - 40	1.15 - 1.10
1976-2000	Parete in mattoni forati	30 - 40	0.80 - 0.60
Periodo	Copertura	Spessore complessivo [cm]	Trasmittanza termica [W/m ² K]
fino al 1900	Tetto a falde con struttura in legno	30	1.80
1901-1945	Tetto a falde con struttura in legno	30	1.80
1946-1960	Tetto in laterizio	35	1.60
1961-1975	Tetto in laterizio	35	1.60
1976-2000	Parete in mattoni forati	30 - 40	0.80 - 0.60

1.3 UNI TS 11300 - Brevi cenni

In Italia la norma UNI TS 11300 [7] rimane il riferimento per le diagnosi energetiche edilizie nonostante l'emanazione del decreto legge 4 giugno 2013, n. 63, legato al recepimento della Direttiva 2010/31/UE. La presente direttiva è volta a promuovere la prestazione energetica degli edifici, delle loro parti e delle unità immobiliari. Gli Stati membri accolgono, a livello nazionale o regionale, un metodo di calcolo della performance energetica che tiene in conto:

- le caratteristiche termiche dell'edificio;
- l'impianto di riscaldamento e di produzione dell'acqua calda sanitaria;
- gli impianti di condizionamento dell'aria;
- gli impianti di illuminazione;
- le condizioni climatiche interne.

Gli Stati membri dovranno stabilire i requisiti minimi di prestazione energetica in modo da raggiungere livelli ottimali in funzione dei costi. Entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione dovranno essere ad *energia quasi zero*. Gli edifici di nuova costruzione occupati da enti pubblici e di proprietà di questi ultimi dovranno rispettare gli stessi principi a partire dal 31 dicembre 2018.

Alla luce di quanto esposto risulta opportuno fornire alcuni brevi cenni tecnici relativi proprio alla norma UNI TS 11300. I fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento (calcolati su base annuale) vengono definiti attraverso le equazioni seguenti

$$Q_{heat} = (Q_T + Q_V) - \eta_{util,H}(Q_i + Q_s)$$

$$Q_{cool} = (Q_i + Q_s) - \eta_{util,C}(Q_T + Q_V)$$

dove Q_{heat} e Q_{cool} rappresentano proprio i fabbisogni di riscaldamento e di raffrescamento; Q_T rappresenta l'energia termica dispersa per trasmissione attraverso gli elementi opachi e trasparenti; Q_V rappresenta le perdite per ventilazione; Q_i rappresenta i guadagni interni e Q_s è un termine connesso con gli apporti solari. Nelle due equazioni compaiono anche i termini $\eta_{util,H}$ e $\eta_{util,C}$. Il primo ($\eta_{util,H}$) rappresenta il coefficiente di utilizzazione dei guadagni (interni e solari) durante la stagione invernale; il secondo ($\eta_{util,C}$) rappresenta il coefficiente di utilizzazione delle dispersioni (per trasmissione e ventilazione) durante la stagione estiva. Questi due coefficienti hanno il compito di descrivere il comportamento inerziale dell'edificio attraverso una formulazione abbastanza complessa che accoglie in sé le proprietà termiche rappresentative dei fenomeni di accumulo termico, ovvero la densità ed il calore specifico dei materiali che compongono le stratigrafie. Nel primo caso il coefficiente di utilizzazione ($\eta_{util,H}$) esprime la capacità dell'edificio di utilizzare il calore accumulato nelle masse per contribuire alla copertura del carico termico. Nel secondo caso ($\eta_{util,C}$), con riferimento al periodo caldo, la dispersione dell'energia accumulata nelle masse, che può avvenire nelle ore notturne più fresche (dando vita a quella che viene definita *inversione termica*), ed il conseguente raffreddamento delle masse stesse, può contribuire a contenere i carichi di raffrescamento. Le formulazioni matematiche dei due coefficienti vengono riportate di seguito.

$$\eta_{util,H} = \frac{1 - \gamma_H^{a_H}}{1 - \gamma_H^{a_H + 1}} \quad \text{se } \gamma_H > 0 \text{ e } \gamma_H \neq 1 \quad ;$$

$$\eta_{util,H} = \frac{a_H}{a_H + 1} \text{ se } \gamma_H=1$$

Dove γ_H rappresenta il rapporto tra i guadagni (ovvero i guadagni solari ed interni) e le perdite (ovvero le perdite per trasmissione e ventilazione); a_H è un termine funzione della costante di tempo della zona termica, definito a sua volta come una funzione della capacità termica di zona. Tale *capacità* è un termine rappresentativo dell'inerzia termica dell'edificio.

$$\eta_{util,C} = \frac{1 - \gamma_C^{-a_C}}{1 - \gamma_C^{-(a_C+1)}} \text{ se } \gamma_C > 0 \text{ e } \gamma_C \neq 1 ;$$

$$\eta_{util,C} = \frac{a_C}{a_C + 1} \text{ se } \gamma_C = 1;$$

$$\eta_{util,C} = 1 \text{ se } \gamma_C < 0$$

Dove γ_C rappresenta il rapporto tra i guadagni (solari ed interni) e le perdite (trasmissione e ventilazione); a_C è un termine connesso con la costante di tempo della zona termica e dell'area finestrata della zona stessa.

La procedura di calcolo, essendo particolarmente onerosa in termini di tempo, viene oggi impiegata attraverso software commerciali. Vale la pena di evidenziare come gli approcci di calcolo semplificati, pur essendo metodi di calcolo definiti e normati, prevedono un sistema di inserimento dati piuttosto semplificato ed immediato. La difficoltà di definire precise condizioni al contorno comporta un significativo scostamento dai dati medi degli altri codici di calcolo (in regime dinamico) sia in termini di dispersioni che di guadagni.

La minore accuratezza è strettamente connessa con gli aspetti seguenti:

- L'impossibilità di tenere in conto le fluttuazioni orarie di temperatura nell'arco delle 24h, considerando una temperatura esterna di progetto pari alla temperatura media giornaliera, considerata costante per l'intero mese;
- L'impossibilità di tenere in conto valori orari della radiazione solare;
- L'approssimazione nel calcolo delle superfici finestrate e della tipologia di infisso;
- L'adozione di valori costanti per le perdite di ventilazione;
- L'adozione di apporti interni non definibili dall'utente e basati su dati di default non chiaramente esplicitati.

Ovviamente questi limiti si riflettono, conseguentemente, in una modellazione globalmente poco accurata. Inoltre agli utenti non è permessa un'analisi delle zone termiche ma solo una lettura conclusiva dei fabbisogni energetici e degli indicatori riassuntivi.

1.4 Codici di calcolo semplificati e dinamici

Definite le richieste dell'Europa per il 2020 ed evidenziati i limiti della metodologia semplificata, sono stati analizzati alcuni software presenti in commercio. Poiché il panorama informatico offre

un'ampia gamma di software quasi-stazionari e software dinamici, sono stati scelti esclusivamente gli strumenti riportati nella Tabella 1.

Tabella 1. Software di calcolo.

Codici quasi-stazionari	Procedura di calcolo	Codici dinamici	Procedura di calcolo
Docet	UNI 11300	TRNSYS	Funzioni di trasferimento
Master Clima 11300	UNI 11300	Design Builder	Funzioni di trasferimento
Termus	UNI 11300	Ecotect	Metodo dell'ammettenza

I codici quasi-stazionari rappresentano quella categoria di software (gratuitamente scaricabili da internet o a pagamento) utilizzabili anche da tecnici non particolarmente esperti, caratterizzati da una interfaccia rigida, ovvero un'interfaccia compilativa che obbliga l'utente ad inserire una serie di valori numerici (o a sceglierne alcuni in base alla norma) al fine di ottenere il calcolo desiderato. Attraverso questo metodo obbligato di inserimento dati, il software esegue il calcolo delle equazioni di bilancio riportate all'interno della UNI TS 11300.

I codici dinamici riportati nella Tabella 1 sono strumenti di calcolo piuttosto complessi, maggiormente utilizzati in campo scientifico [8,9,10,11]. Di seguito vengono riportate le loro caratteristiche ed informazioni principali.

TRNSYS [12] è un programma di simulazione dinamica caratterizzato da una struttura modulare il cui nome sta per *Transient System Simulation Tool*. Ai fini della simulazione del sistema oggetto di analisi è richiesto di specificare i componenti che costituiscono il sistema stesso e il modo in cui questi componenti interagiscano tra loro. TRNSYS ha iniziato ad essere disponibile commercialmente dal 1975 e nel corso degli anni il software è stato costantemente sviluppato grazie al lavoro congiunto di una serie di istituzioni, quali:

- Solar Energy Laboratory (SEL), USA;
- Thermal Energy Systems Specialist (TESS), USA;
- Aiguasol Enginyeria, Spagna;
- Centre Scientifique et technique du Batiment (CSTB), Francia;
- Transsolar GmbH Energietechnik, Germania.

Il software è essenzialmente composto da due moduli:

- *Simulation Studio*, il programma di interfaccia dedicato all'impostazione e all'esecuzione delle simulazioni;
- *TRNbuild*, il programma di interfaccia dedicato alla descrizione dettagliata dell'edificio.

La simulazione è costituita dall'assemblaggio di più componenti (chiamati *Types*) efficacemente interconnessi in modo tale da svolgere una sequenza ordinata di operazioni. Tutti i componenti utilizzati e le modalità secondo le quali questi sono chiamati ad interagire vengono raccolti in un file che rappresenta l'input vero e proprio al programma. Tale file viene creato e modificato mediante il programma di interfaccia Simulation Studio.

Analizzando i bilanci energetici che il software esegue per ogni zona termica è possibile affermare come l'elemento di calcolo su cui compiere tutte le considerazioni matematiche è costituito dalla zona termica, un'entità non geometrica che descrive il comportamento termico di uno o più locali che si vuole modellare. Il modello matematico è a parametri concentrati, per cui la singola zona termica è

descritta come un nodo, caratterizzato dalla capacità termica del volume d'aria della zona stessa, cui sono applicate le diverse correlazioni di bilancio energetico. Per il generico nodo d'aria i -esimo è possibile scrivere il seguente bilancio energetico relativo agli scambi termici per convezione, limitati al solo calore sensibile:

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{inf} + \dot{Q}_{vent} + \dot{Q}_{g,c,i} + \dot{Q}_{cplg,i} + \dot{Q}_{surf,i}$$

dove il flusso termico Q_i verso il nodo d'aria è espresso come somma algebrica delle seguenti quantità:

$Q_{inf,i}$ è l'energia scambiata tra la zona e l'ambiente esterno a causa delle infiltrazioni d'aria.

$$\dot{Q}_{inf,i} = \dot{m}_{inf} C_p (T_o - T_i)$$

dove T_i è la temperatura del nodo i -esimo, T_o la temperatura dell'aria esterna, m_{inf} la portata massica di aria esterna che si infiltra nell'ambiente, C_p il calore specifico dell'aria.

Q_{vent} è l'apporto termico correlato alla ventilazione forzata (per esempio impianto HVAC, ovvero Heating, Ventilating and Air Conditioning).

$$\dot{Q}_{vent} = \dot{m}_{vent} C_p (T_{vent} - T_i)$$

con T_{vent} pari alla temperatura di immissione nell'ambiente dell'aria di rinnovo, m_{vent} la portata massica d'aria di rinnovo.

$Q_{g,c,i}$ sono gli apporti interni gratuiti convettivi, originati dalla presenza di apparecchiature, fonti di calore, dall'illuminazione, dalla presenza di persone e così via.

$Q_{cplg,i}$ è l'energia scambiata tramite passaggio d'aria tra una zona termica e l'altra dell'edificio, sia essa climatizzata o meno.

$$\dot{Q}_{cplg,i} = \dot{m}_{cplg,i} C_p (T_{zone,j} - T_i)$$

in cui $T_{zone,j}$ è la temperatura dell'aria nella zona j -esima, mentre m_{coupl} è la portata massica d'aria, dell'aria scambiata tra la zona termica i e quella j .

$Q_{surf,i}$ è la quantità di calore scambiata, per convezione, tra l'aria all'interno della zona termica e tutte le pareti (sia opache che trasparenti) che la delimitano.

Passando alla scrittura del bilancio energetico, relativo allo scambio termico per solo irraggiamento, della generica parete i -esima si ha:

$$\dot{Q}_{r,wi} = \dot{Q}_{g,r,i,wi} + \dot{Q}_{sol,wi} + \dot{Q}_{long,wi} + \dot{Q}_{wall-gain}$$

dove $Q_{r,wi}$ è il flusso termico radiativo verso il nodo che rappresenta la parete, $Q_{g,r,i,wi}$ è relativo agli apporti interni gratuiti radiativi, $Q_{sol,wi}$ è l'apporto solare verso la parete, causato dalla radiazione solare che ha attraversato le superfici trasparenti (vetrate), $Q_{long,wi}$ è la radiazione a onde lunghe (infrarosso) scambiata tra la parete i e le altre superfici della zona termica, $Q_{wall-gain}$ rappresenta l'eventuale apporto radiante, definito dall'utente, sul nodo che rappresenta la superficie.

Per quanto riguarda gli scambi termici su una parete possiamo considerare la parete stessa come costituita da due strati: quello esterno a temperatura $T_{s,o}$ che si trova a contatto con l'aria ambiente alla temperatura $T_{a,o}$ e che scambia calore per convezione ($q_{c,s,o}$) e irraggiamento ($q_{r,s,o}$); quello interno a temperatura $T_{s,i}$ che scambia anch'esso con la zona termica, a temperatura T_i , calore per convezione

$(q_{c,s,i})$ e irraggiamento $(q_{r,s,i})$. Occorre inoltre considerare, in accordo con l'equazione, il flusso termico radiativo costituito dagli apporti solari e/o dagli apporti interni, che viene assorbito dalle due pareti $S_{s,o}$ e $S_{s,i}$. Per quanto riguarda il calore scambiato per conduzione, possiamo distinguere due flussi termici: il primo che avviene dalla superficie esterna verso il cuore della parete $(q_{s,o})$; l'altro $(q_{s,i})$ che dal cuore della parete va verso la superficie interna a contatto con la zona termica i .

Il modello di parete appena descritto, viene modellato da TRNSYS utilizzando la metodologia delle funzioni di trasferimento (Mitalas [13]), ossia utilizzando equazioni che legano lo scambio termico conduttivo con i valori delle temperature di parete, tramite delle serie di coefficienti numerici. In questo modo la parete viene vista come una scatola nera, trascurando il profilo di temperatura nel solido, descrivendone però la storia termica in termini di temperatura di parete e flusso termico entrante ed uscente. Tali equazioni sono delle serie numeriche, il cui indice k indica l'istante temporale in cui è eseguita la valutazione, $k=0$ per l'istante attuale, $k=1$ per l'istante precedente, etc.

$$\begin{aligned}\dot{q}_{s,i} &= \sum_{k=0}^{n_{bs}} b_s^k \cdot T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{cs}} c_s^k \cdot T_{s,i}^k - \sum_{k=0}^{n_{ds}} d_s^k \cdot \dot{q}_{s,i}^k \\ \dot{q}_{s,o} &= \sum_{k=0}^{n_{as}} a_s^k \cdot T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{cs}} b_s^k \cdot T_{s,i}^k - \sum_{k=0}^{n_{ds}} d_s^k \cdot \dot{q}_{s,o}^k\end{aligned}$$

L'utilizzo di questa tecnica è valido sia per le pareti opache che per quelle trasparenti. In quest'ultimo caso il codice modella la vetrata come un muro senza massa, parzialmente trasparente alla radiazione solare ma opaco per la radiazione ad onde lunghe (infrarosso).

DESIGN BUILDER [14] contiene il motore di simulazione energetica dinamica EnergyPlus (2001), sviluppato dal DOE (Department of Energy, USA). È uno strumento di calcolo utile per eseguire simulazioni dinamiche e fluidodinamiche. Progettato per facilitare il processo di modellazione ed inserimento dei dati, il software consente di verificare e comparare i consumi energetici degli edifici, i parametri di comfort abitativo, i livelli di illuminazione naturale ed artificiale degli ambienti, le prestazioni di differenti materiali e configurazioni impiantistiche.

ECOTECH [15] è un software per la progettazione architettonica sostenibile, dalla fase iniziale alla determinazione dei dettagli. Il programma di calcolo è in grado di fornire diverse funzionalità per la simulazione e l'analisi energetica. Il prodotto consente di eseguire analisi energetiche dell'intero edificio, calcolo dei carichi di riscaldamento e raffrescamento su modelli di analisi che valutano gli effetti derivanti da fattori di occupazione, guadagni interni, visualizzazione dell'irraggiamento solare incidente su vetrate e superfici in qualunque periodo dell'anno, calcolo dei fattori diurni e dei livelli di illuminamento in qualunque punto del modello e, infine, visualizzazione della posizione e del percorso del sole relativi al modello per qualsiasi data, orario ed ubicazione.

1.5 Analisi delle prestazioni energetiche di una parete

Molti studi si concentrano sullo studio dell'isolamento e la progettazione di pareti esterne con l'obiettivo di mitigare l'energia utilizzata per il riscaldamento ed il raffreddamento degli edifici. Altresì l'ottimizzazione dello spessore di isolamento per un dato tempo ed i risvolti economici sono stati indagati da numerosi autori. Altri studi hanno analizzato l'influenza della posizione del materiale isolante all'interno di una parete multistrato, dimostrando come alcune configurazioni stratigrafiche

migliorino le prestazioni in condizioni periodiche stabili, anche con la stessa quantità di materiale da costruzione. Le caratteristiche di una parete *stand-alone* (cioè indipendente da un modello di simulazione dell'intero edificio) sono generalmente stabilite utilizzando tre parametri principali: la resistenza termica (il cui valore inverso, includendo le resistenze superficiali, è la trasmittanza termica), l'attenuazione dell'onda termica ed il suo sfasamento temporale:

- *Trasmittanza* - flusso di calore che attraversa una superficie unitaria sottoposta a differenza pari ad 1 grado Kelvin (o Celsius). È legata alle caratteristiche del materiale che costituisce la struttura. Essa si assume pari all'inverso della sommatoria delle resistenze termiche degli strati che compongono la superficie considerata;
- *Attenuazione* - rapporto tra la variazione massima della temperatura esterna e la variazione massima della temperatura interna in riferimento alla temperatura media della superficie interna;
- *Tempo di ritardo (o sfasamento)* - arco di tempo (espresso in ore) che serve all'onda termica per fluire dall'esterno all'interno, attraverso un materiale da costruzione. Maggiore è lo sfasamento, più lungo sarà il tempo di passaggio del calore all'interno dell'edificio.

La Figura 2 esprime per via grafica i concetti di attenuazione e sfasamento.

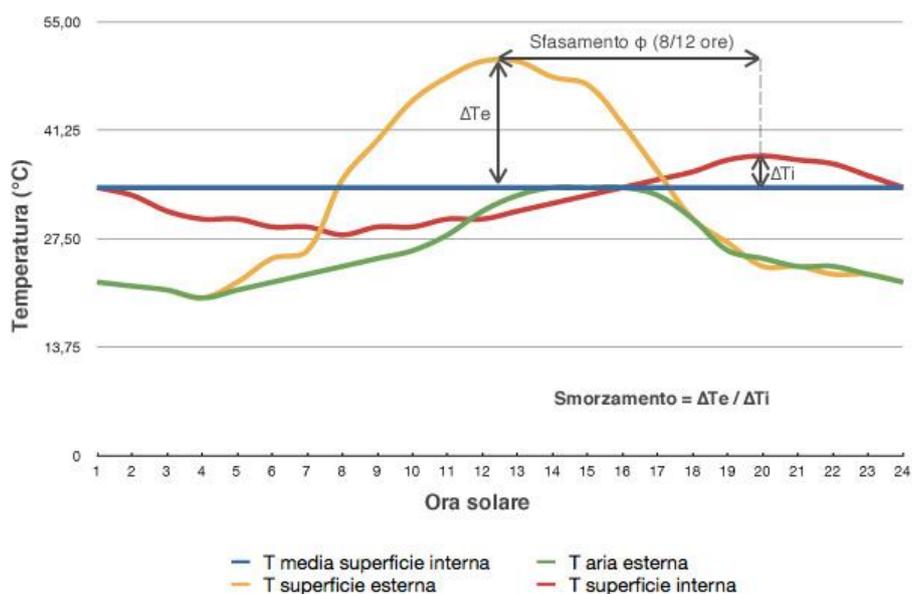


Figura 2. Attenuazione e sfasamento dell'onda termica. (Fonte: <http://www.biostylehouse.com>).

La trasmittanza è ricavabile attraverso uno strumento di misura chiamato *termoflussimetro*. Attenuazione e sfasamento sono ricavabili utilizzando sonde di temperatura superficiale, applicate sulle due facce del muro: l'insieme dei valori registrati dallo strumento consente di mappare l'andamento temporale delle temperature delle superfici esterna ed interna, potendo così valutare il tempo di ritardo e lo smorzamento dell'onda termica. È noto che attenuazione e sfasamento sono parametri connessi con il comportamento dinamico delle pareti. In altre parole sono parametri connessi con le proprietà di *densità* e *calore specifico* dei materiali presenti all'interno delle murature. Spesso, tali proprietà termiche restano sconosciute (ci si limita ad una esclusiva analisi termoflussimetrica) oppure, quando risulta possibile eseguire una diagnosi ispettiva, vengono stabilite in maniera approssimata utilizzando le norme. La Figura 3 riassume i livelli di approssimazione esistenti, relativi alla definizione delle prestazioni dei pacchetti murari.



Figura 3. Approssimazione correlata alle performance di parete.

Storicamente il comportamento di un corpo che scambia calore per sola conduzione fu studiato da Fourier, attraverso l'analisi di un mezzo semi infinito che va sotto il nome di *Muro di Fourier*. L'andamento nel tempo della temperatura sulla superficie limite è del tipo sinusoidale

$$T(0, t) = T_m + \theta_0 \text{sen}(\omega t)$$

dove T_m è il valor medio di temperatura; θ_0 è la semi-ampiezza di oscillazione; ω è la pulsazione dell'oscillazione ($\omega=2\pi/\tau_0$). τ_0 è il periodo dell'oscillazione (per un edificio il ciclo termico è pari a 24h). Poiché, in un approccio monodimensionale, la temperatura non dipende da y e z , l'equazione di Fourier diventa

$$D \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t}$$

avendo indicato con D la diffusività termica (ovvero il rapporto tra conducibilità termica, a numeratore, ed il prodotto tra densità e calore specifico, a denominatore). La soluzione dell'equazione di Fourier è la seguente

$$T(x, t) = T_m + \theta_0 e^{-\beta x} \text{sen}(\omega t - \beta x)$$

dove $\beta = \sqrt{\pi/D\tau_0}$. Il prodotto βx è un numero puro ed è denominato *ritardo di fase* e misura lo sfasamento, in radianti, tra l'oscillazione termica all'ascissa x e quella imposta sulla superficie limite. Il rapporto tra la semi-ampiezza di oscillazione a distanza x e quella sulla superficie limite prende il nome di *fattore di smorzamento* (μ) dell'oscillazione termica

$$\mu(x) = \frac{\theta(x)}{\theta_0} = e^{-\beta x}$$

Una parete può essere assimilata ad una *lastra piana*. Se la parete è sollecitata termicamente in modo ciclico può essere effettuato uno studio della parete in regime periodico stabilizzato (trascurando il transitorio iniziale). Ipotizzando di analizzare una lastra piana di spessore L , sollecitata su entrambe le facce dalle temperature

$$T_1 = T_{m1} + \theta_0 \cos(\omega t)$$

$$T_2 = T_{m2} + \theta_L \cos(\omega t)$$

dove T_{m1} e T_{m2} sono i valori medi di temperatura; θ_0 e θ_L sono le semi-ampiezze di oscillazione e ω è la pulsazione dell'oscillazione. Le temperature ad un certo istante di tempo generico e per una profondità generica saranno espresse come

$$T_1(x, t) = T_{m1} + \theta_0 e^{-\beta x} \cos(\omega t - \beta x)$$

$$T_2(x, t) = T_{m2} + \theta_L e^{-\beta x} \cos(\omega t - \beta x)$$

Tenendo in conto la formula di Eulero che consente una riscrittura complessa e tralasciando i termini costanti, la soluzione dell'equazione di Fourier diventa

$$\bar{T}(x, t) = A e^{j\omega t - kx} + B e^{j\omega t + kx}$$

Imponendo le condizioni al contorno (quindi le condizioni relative alle facce poste rispettivamente in $x=0$ e $x=L$) si ottengono le seguenti relazioni

$$x = 0$$

$$\bar{T}(0, t) = \theta_0 e^{j\omega t} = (A + B) e^{j\omega t}$$

$$\bar{q}(0, t) = -\lambda \left. \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right|_{x=0} = q_0 e^{j\omega t} = \lambda K (A - B) e^{j\omega t}$$

si ottiene un sistema di due equazioni in due incognite in cui è possibile elidere $e^{j\omega t}$.

$$\theta_0 = A + B$$

$$q_0 = \lambda K (A - B)$$

da cui è possibile ottenere un'espressione per A e B

$$A = \frac{\theta_0}{2} + \frac{q_0}{2\lambda K}$$

$$B = \frac{\theta_0}{2} - \frac{q_0}{2\lambda K}$$

considerando ora la faccia posta in $x=L$

$$x = L$$

$$\bar{T}(L, t) = \theta_L e^{j\omega t} = (A e^{-KL} + B e^{KL}) e^{j\omega t}$$

$$\bar{q}(L, t) = -\lambda \left. \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right|_{x=L} = q_L e^{j\omega t} = \lambda K (A e^{-KL} - B e^{KL}) e^{j\omega t}$$

sostituendo le espressioni di A e B all'interno delle equazioni si ottiene

$$\theta_L = \theta_0 \cosh(KL) - q_0 \frac{\sinh(KL)}{\lambda K}$$

$$q_L = -\theta_0 \lambda K \sinh(KL) + q_0 \cosh(KL)$$

è possibile quindi riscrivere la coppia di equazioni in forma matriciale

$$\begin{pmatrix} \theta_L \\ q_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh(KL) & -\frac{\sinh(KL)}{\lambda K} \\ -\lambda K \sinh(KL) & \cosh(KL) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \theta_0 \\ q_0 \end{pmatrix}$$

dove la matrice due per due viene definita *matrice di trasferimento*. Nel caso di pareti multistrato, ad ogni strato è possibile associare una matrice di trasmissione. Essendo il prodotto tra matrici non commutativo, l'alternanza di strati caratterizzati da proprietà termiche differenti comporta comportamenti di parete differenti.

2. Inquadramento scientifico del problema

Durante gli ultimi anni c'è stato un sempre maggior interesse verso la riduzione dell'impatto ambientale degli edifici in quanto responsabili di oltre il 35% dei consumi totali di energia su scala italiana e globale. Capire le reali prestazioni di un edificio significa comprendere il reale comportamento delle sue parti strutturali. Nel caso delle superfici opache esiste l'esigenza di capire il reale comportamento dei pacchetti murari al fine di intervenire nel modo più opportuno. Nel caso in cui non sia possibile eseguire rilievi strumentali o reperire informazioni affidabili sulle stratigrafie dei pacchetti murari, è possibile considerare la classificazione riportata all'interno della norma UNI TS 11300 e, stabilito l'anno di costruzione, è possibile definire una stratigrafia tipica di quel periodo storico e associare, in base allo spessore della parete, il valore di trasmittanza termica suggerito dalla norma stessa. Inoltre, qualora la stratigrafia dei pacchetti murari dovesse essere nota ma, al tempo stesso, non fosse possibile reperire *informazioni certe* sulle proprietà termiche dei materiali, è possibile far uso delle norme UNI 10351 [20] e UNI 10355 [21]. Le norme appena citate indicano valori di riferimento delle proprietà termiche (conducibilità termica, calore specifico e densità) dei materiali comunemente utilizzati in edilizia o valori di conduttanza per elementi disomogenei (mattoni e blocchi forati).

La superiorità dei software dinamici nel tenere in conto le proprietà inerziali delle strutture e l'evoluzione temporale della fisica, consentono di affermare che tali strumenti possono essere considerati essenziali nella progettazione di nuovi edifici: in progettazioni *ex novo* le proprietà termiche dei materiali possono essere ricavate direttamente dalle schede tecniche dei prodotti.

Nel caso di ristrutturazioni edilizie (qualora non vi sia la demolizione dell'involucro), allorché si volessero migliorare le prestazioni energetiche, potrebbe invece essere conveniente procedere con una valutazione sperimentale *in situ*. Pur consapevoli che, nota la stratigrafia di una parete, la trasmittanza termica può essere calcolata in accordo con la norma UNI EN ISO 6946 [22], tuttavia, non sempre è possibile conoscere l'effettiva composizione stratigrafica di un muro: ciò avviene quando non è possibile estrarre campioni di materiale o quando si ipotizza che ragioni costruttive abbiano modificato il progetto originario. In tali casi la valutazione in opera può rivelarsi la soluzione più adeguata.

Occorre però sottolineare che l'impossibilità di reperire informazioni attendibili da un lato e l'impiego di indagini strumentali che riguardano gli interi pacchetti murari dall'altro, fanno nascere la necessità di formalizzare un approccio metodologico per la comprensione del comportamento dell'intera parete, superando così l'esigenza di informazioni relative ai singoli strati e implementando le attuali metodologie semplificate per il calcolo dei fabbisogni energetici. In questo modo è possibile superare la semplice valutazione basata sul concetto di trasmittanza termica stazionaria (definita considerando esclusivamente la conducibilità termica dei materiali) ed indagare proprietà termiche aggiuntive (nonché fondamentali) come la densità ed il calore specifico. Conseguentemente, ogni pacchetto murario di edifici esistenti potrebbe essere interpretato come un singolo elemento di scambio termico caratterizzato da proprietà termiche equivalenti che riguardano proprio l'intero pacchetto e non i singoli strati. La Figura 4 riassume i passaggi chiave del progetto di ricerca svolto.

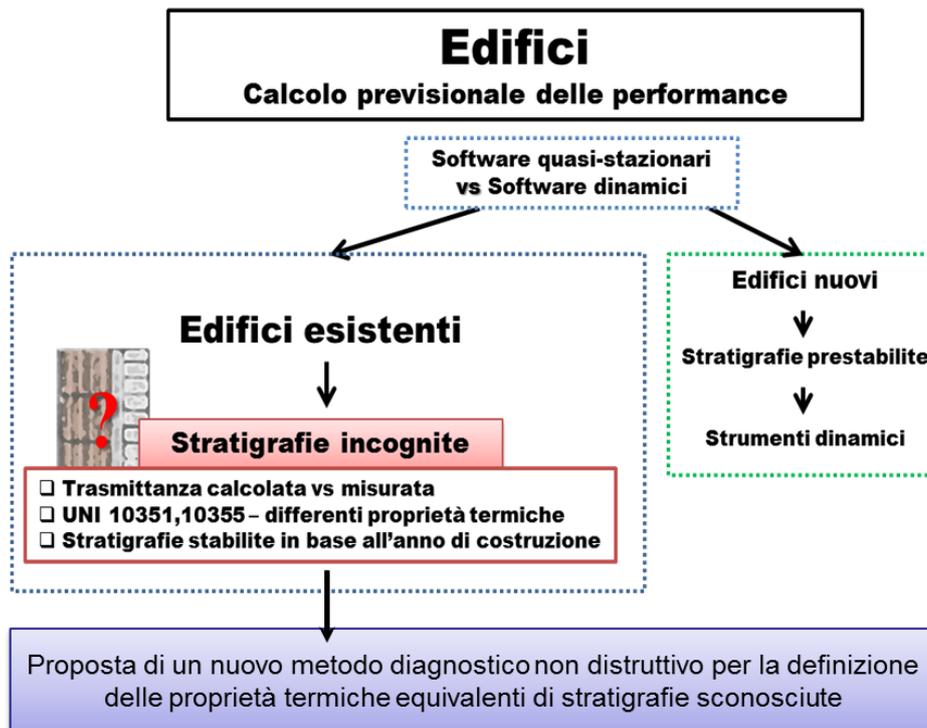


Figura 4. Passaggi chiave della ricerca.

3. Metodologie utilizzate

L'attività di ricerca svolta in questa tesi di dottorato riguarda la proposta di una metodologia per la stima dei parametri termici equivalenti di pacchetti murari, le cui stratigrafie sono sconosciute. Tale proposta nasce all'interno di un percorso che inizia con la comprensione delle prestazioni energetiche degli involucri edilizi attraverso strumenti di simulazione, passa attraverso il concetto di diagnosi energetica strumentale e sfocia in una rielaborazione degli stessi per dar vita ad un nuovo approccio metodologico.

3.1 Confronto tra codici quasi-stazionari e codici dinamici

L'approccio adottato durante la fase iniziale del progetto di ricerca è rappresentato nello schema mostrato dalla Figura 5, attraverso il quale è possibile notare come, date specifiche condizioni al contorno (condizioni ambientali esterne, utilizzo dell'edificio in termini di guadagni interni e caratteristiche tipologico-costruttive), è stato eseguito un confronto tra codici di calcolo differenti per comprenderne potenzialità e limiti. Ovviamente, ogni modello matematico necessita di una validazione sperimentale attraverso l'utilizzo di opportuni strumenti di misura. Ciò è necessario affinché si possa affermare con certezza che la simulazione che si sta eseguendo sia effettivamente rappresentativa dell'edificio oggetto di studio.

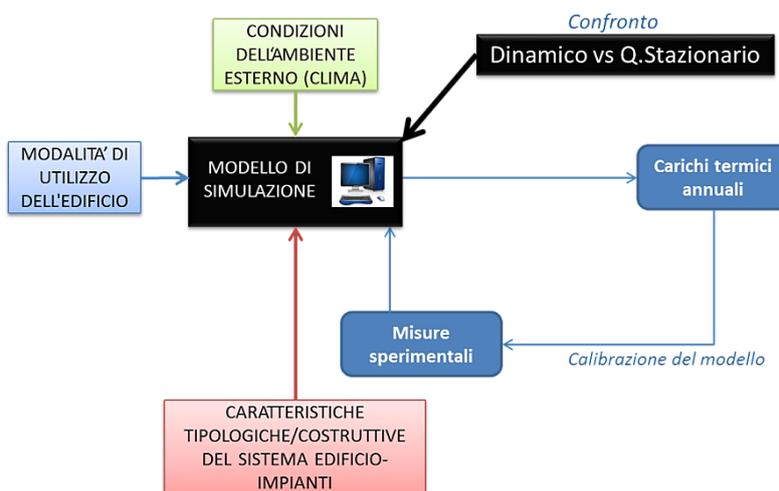


Figura 5. Schema logico della fase iniziale del progetto di ricerca.

Risulta evidente come il calcolo delle prestazioni energetiche degli involucri edilizi e le differenze eventualmente riscontrabili tra software dinamici e software stazionari non debbano esclusivamente essere funzione delle equazioni di bilancio termico adottate, ma anche dei dati meteo presenti nei simulatori. Appreso l'utilizzo dei diversi software, è stato quindi eseguito un confronto tra i weather-data presenti all'interno di ogni programma, cercando di evidenziarne le principali differenze o

anomalie. A riguardo sono stati considerati: i valori d'irraggiamento solare dei software (che sono stati poi confrontati con i valori della radiazione solare globale giornaliera media mensile su superficie orizzontale, presenti nell'*Atlante Italiano della radiazione solare – ENEA [23]*); sono state analizzate e confrontate le temperature esterne mensili; sono stati confrontati i valori di umidità relativa e le velocità del vento. Le differenze riscontrate sono evidenziate nelle figure seguenti (Figure 6, 7, 8, 9).

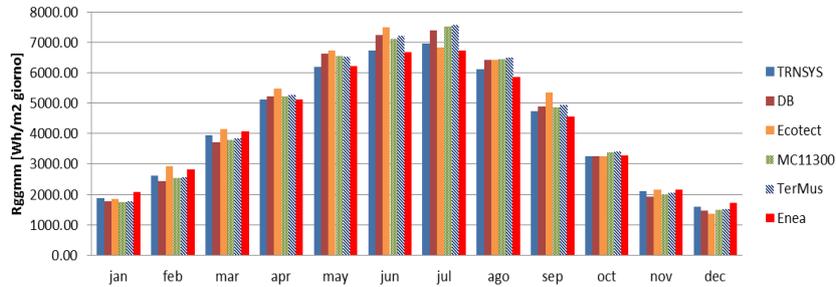


Figura 6. Radiazione solare globale giornaliera media mensile su superficie orizzontale.

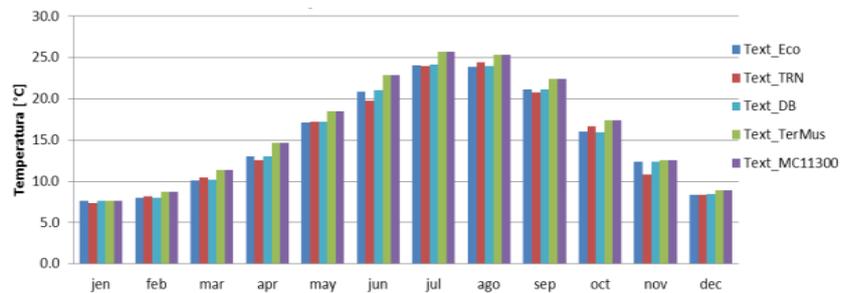


Figura 7. Temperature medie mensili.

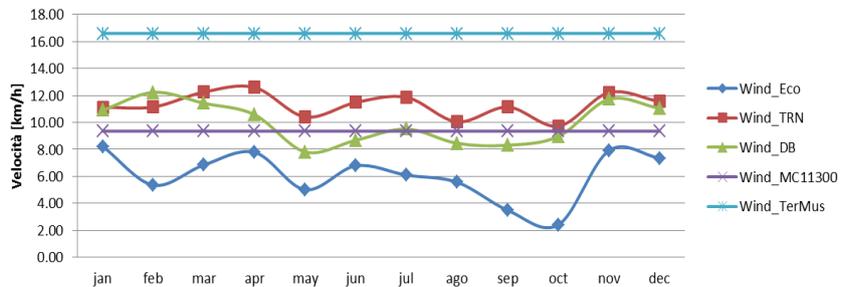


Figura 8. Velocità del vento medie mensili

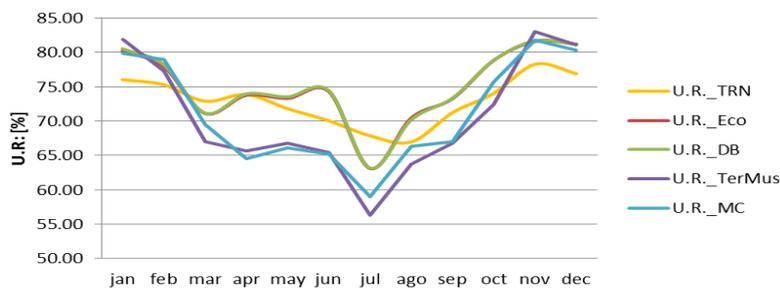


Figura 9. Umidità relativa media mensile.

Nonostante TRNSYS (v.16, disponibile durante l'intero svolgimento del progetto di ricerca) non sia in grado di offrire una soluzione per tenere in conto gli ombreggiamenti generati dalla vegetazione o da edifici adiacenti, è stato pensato un modo per colmare questa lacuna, integrando l'utilizzo del software Ecotect in TRNSYS secondo lo schema seguente. Gli ombreggiamenti possono essere tenuti in conto all'interno di TRNSYS creando delle forzanti esterne che descrivano gli ombreggiamenti per le varie esposizioni. Quest'approccio prevede la costruzione di un primo modello attraverso Ecotect, dal quale è possibile ricavare gli ombreggiamenti per le varie esposizioni in forma percentuale. In questo modo è possibile utilizzare una specifica *Type (Forcing Function, Type14h)* in TRNSYS in grado di accogliere i valori degli ombreggiamenti. Successivamente tali valori possono essere impiegati per ridurre il contributo dell'irraggiamento solare alle varie esposizioni utilizzando una seconda *Type* (avente la funzione di calcolatore) nella quale è possibile imporre una correzione della radiazione impattante attraverso un'equazione del tipo $Rad_{SUD}^{NEW} = Rad_{SUD} \cdot (1 - ForcingFunction_{SUD})$. La Figura 10 riassume la logica utilizzata per risolvere il problema.

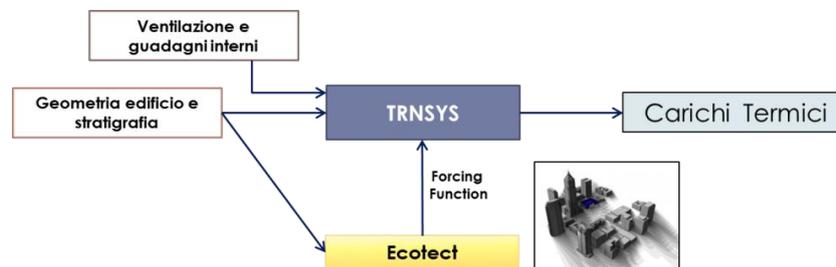


Figura 10. Approccio integrato per l'ombreggiamento.

3.2 Calibrazione dei modelli

Come già affermato, ogni modello matematico necessita di una validazione sperimentale attraverso l'utilizzo di opportuni strumenti di misura. Ciò è necessario affinché si possa affermare che la simulazione eseguita sia effettivamente rappresentativa dell'edificio oggetto di studio. Per verificare la rappresentatività dei modelli è necessario fare riferimento a parametri di controllo in grado di rappresentare il comportamento energetico reale degli edifici: generalmente i protocolli e le normative (per quanto riguarda i protocolli di calibrazione si intendono IPMVP [24], M&V Guidelines [25] e ASHRAE Guidelines [26]; per le normative tecniche ci si riferisce alla norma UNI TS 11300 e alla norma UNI CEI TR 11428 [27] sulla diagnosi energetica degli edifici) indicano come dato di confronto i consumi effettivi di combustibile o di altre fonti energetiche dell'edificio. Tuttavia si possono verificare casi in cui non è possibile risalire ai consumi effettivi:

- Edifici dismessi: l'impianto termico non è in funzione e quindi non è possibile dedurre un fabbisogno energetico di riferimento;
- Edifici privi di impianto termico;
- Edifici in cui la fornitura di combustibile è gestita sulla base di contratti forfettari: la fatturazione è relativa ad un consumo fittizio connesso alle caratteristiche dell'edificio (volume riscaldato, potenza dell'impianto, tipologia di combustibile) e, di conseguenza, non può essere adottato come parametro per la calibrazione.

In questi casi la calibrazione può essere fatta attraverso l'utilizzo delle temperature misurate all'interno di un ambiente di controllo: si possono utilizzare i valori relativi alla temperatura dell'aria oppure delle superfici di involucro. La condizione necessaria per l'adozione di un parametro di calibrazione è che sia riferito allo stesso periodo di tempo per cui è stato definito il modello, in modo che i risultati siano confrontabili e gli scostamenti non siano dovuti a particolari condizioni al contorno contingenti: ad esempio, se per la costruzione del modello si adottano i dati meteo dell'anno corrente e per la calibrazione si utilizzano i consumi effettivi dell'anno precedente, si possono riscontrare errori dovuti alle differenti condizioni climatiche che non dipendono dalla generale affidabilità del modello [28].

A riguardo sono stati impiegati i seguenti strumenti di misura del Laboratorio di Fisica Tecnica dell'Università degli Studi Roma TRE:

- *Centralina microclimatica* - strumento per la valutazione del microclima degli ambienti interni. È dotato dei seguenti sensori: globo-termometro, anemometro a filo caldo, sensore di temperatura e sensore psicrometrico a bulbo secco ed umido a ventilazione forzata;
- *Termoflussimetro* - strumento per la misura della trasmittanza termica di elementi edilizi;
- *Sonde di temperatura superficiale* - strumento per la misura delle temperature superficiali di componenti;
- *Termocamera* - telecamera, sensibile alla radiazione infrarossa, capace di ottenere immagini o riprese termografiche. Risulta uno strumento particolarmente utile per la valutazione dei ponti termici o anomalie connesse con gli impianti.

Il processo di calibrazione si basa sulla valutazione di due indici: il Mean Bias Error (MBE) e il coefficiente di variazione dell'errore quadratico medio (CV-RMSE), definiti come:

$$MBE(\%) = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} (m_i - s_i)}{\sum_{i=1}^{N_p} (m_i)}$$

$$CV_{RMSE}(\%) = \frac{\sqrt{(\sum_{i=1}^{N_p} (m_i - s_i)^2 / N_p)}}{\overline{m}}$$

dove m_i e s_i sono rispettivamente i dati misurati e simulati all'istante i -esimo; N_p è il numero di acquisizioni e \overline{m} è il valor medio dei dati misurati. Attualmente i modelli di simulazione possono essere definiti come *calibrati* se incontrano i criteri riportati all'interno delle linee guida ASHRAE [26].

3.3 Campagne di misura sperimentali

3.3.1 Misure termoflussimetriche

Il coefficiente di trasferimento del calore, detto anche trasmittanza termica, è la misura del flusso termico che per una differenza di temperatura di 1 Kelvin fluisce attraverso 1 m² di materiale. L'unità

di misura è il W/m^2K . Il fabbisogno energetico di un fabbricato dipende dall'isolamento termico del fabbricato stesso in rapporto alle condizioni meteorologiche della località in cui il fabbricato è situato. Nel calcolo dell'isolamento termico entrano in gioco le geometrie degli edifici e i relativi ponti termici, oltre al valore di trasmittanza delle singole pareti o superfici vetrate che compongono l'involucro esterno. Per calcolare il fabbisogno termico, occorre determinare il valore di trasmittanza termica (U) delle differenti parti costruttive che devono rientrare, a seconda delle zone climatiche, entro specificati limiti. Più è piccolo il valore U del componente e minori sono le dispersioni. Il valore U di una parete può essere calcolato attraverso la metodologia fornita dalla norma UNI EN ISO 6946. Sapendo quali sono i valori della conducibilità termica di ciascuno strato costituente la muratura, è possibile calcolare il valore U totale semplicemente applicando la ben nota *analogia elettro-termica* la quale si basa sul semplice concetto di *somma di resistenze in serie*: in altre parole, è sufficiente sommare tra loro le resistenze termiche di ogni singolo strato e le resistenze superficiali interne ed esterne delle pareti.

Quando non è possibile eseguire il calcolo della trasmittanza termica di un pacchetto murario è possibile ricorrere all'analisi termoflussimetrica, mediante l'utilizzo di un termoflussimetro, in accordo con la norma UNI ISO 9869 [29].

Il termoflussimetro è uno strumento che serve a misurare la trasmittanza termica di una parete, ovvero la capacità della parete stessa a trasmettere o meno il calore. Il termoflussimetro si usa, in ambito edilizio, quando si vuole verificare se il potere isolante misurato della parete corrisponde a quello calcolato oppure quando non si conosce la trasmittanza, perché si ignorano materiale e/o tecnica costruttiva dell'opera muraria. La misura con il termoflussimetro è una misura *non distruttiva* in quanto non altera la struttura e la funzionalità della parete.

Molti ricercatori si sono occupati di misure di trasmittanza termica di componenti opachi [30,31,32,33]. Frequentemente i valori misurati non coincidono con i valori calcolati: ciò avviene in particolare nel caso di pacchetti murari esistenti, i cui materiali vengono dedotti sulla base di ispezioni visive e le cui proprietà termiche vengono scelte in maniera arbitraria attraverso le norme UNI 10351 e UNI 10355, le quali come già detto forniscono i valori di conducibilità termica dei materiali più utilizzati nel panorama edilizio, utili per il calcolo della trasmittanza. La Tabella 4 riporta alcuni esempi riguardanti la variabilità dei valori di conducibilità termica, connessa con i diversi tipi di materiale.

Tabella 4. Variabilità dei valori di conducibilità termica.

Tipo di materiale	Descrizione	Conducibilità termica [W/mK]
Intonaco	Intonaco di gesso	0.400
		0.570
	Intonaco di gesso e sabbia	0.800
	Intonaco di CLS e sabbia	1.000
Calcestruzzo	CLS con aggreganti naturali	1.263
		1.613
		2.075
	CLS di argille espanse	0.325
		0.702
		0.914
	CLS cellulare di autoclave	0.168
	0.310	
	CLS di inerti vulcanici	0.580

Il livello di dettaglio offerto dalla normativa è fondamentale nel caso in cui si abbia la certezza del tipo di materiale presente nelle stratigrafie. Al contrario, quando le certezze vengono meno tali distinzioni possono indurre in approssimazioni connesse con l'arbitrarietà della scelta del tipo di materiale effettivamente presente nel pacchetto murario.

Inoltre, la UNI EN ISO 6946 suggerisce valori di riferimento per i coefficienti adduttivi (coefficienti che conglobano gli scambi termici convettivi e radiativi tra parete ed ambiente). La norma indica valori costanti al variare della direzione del flusso termico disperso (la Tabella 5 mostra i valori suggeriti dalla normativa espressi come resistenze termiche).

Tabella 5. Resistenze termiche superficiali [m²K/W].

Resistenze adduttive	Flusso ascendente	Flusso orizzontale	Flusso discendente
R _{si}	0.10	0.13	0.17
R _{se}	0.04	0.04	0.04

Le resistenze termiche superficiali sono espresse come l'inverso della somma del coefficiente di convezione (h_c) e del coefficiente d'irraggiamento (h_r).

$$R_s = \frac{1}{h_c + h_r}$$

Considerando un flusso termico disperso in direzione orizzontale, con riferimento alla sola superficie interna, i valori assunti per il coefficiente di scambio convettivo ed il coefficiente di scambio radiativo sono rispettivamente pari a 2.5 W/m²K e 5.19 W/m²K, con un coefficiente di adduzione complessivo pari a 7.69 W/m²K.

In letteratura esistono varie espressioni per i coefficienti di scambio termico, in particolare per gli scambi termici convettivi (sia esterni che interni). È noto che le misure di trasmittanza si basano sulla capacità del termoflussimetro di acquisire i valori di temperatura in punti differenti: lo strumento acquisisce la temperatura dell'aria interna (T_{int}), le temperature superficiali della piastra termoflussimetrica (T_{s1}, T_{s2}) e la temperatura dell'aria esterna (T_{ext}). Lo strumento, misurando il flusso termico che attraversa la piastra, è in grado di fornire valori di trasmittanza in base alla seguente relazione

$$q = U(T_{int} - T_{ext})$$

Esiste però un modo ulteriore per eseguire una misura di trasmittanza termica: è possibile ricorrere al *metodo della resistenza liminare*. In altre parole, conoscendo il coefficiente di resistenza superficiale interna e la temperatura superficiale interna della parete è possibile applicare la seguente equazione

$$q = h_{add}(T_{int} - T_{si}) = U(T_{int} - T_{ext})$$

dove h_{add} è il coefficiente di scambio termico adduttivo pari a 7.69 W/m²K. In questo modo il flusso termico scambiato è una funzione del coefficiente di scambio termico adduttivo suggerito dalla norma UNI EN ISO 6946. In base alla variazione temporale delle temperature, il termoflussimetro acquisisce numerosi valori di trasmittanza termica che devono poi essere elaborati attraverso il *metodo delle medie progressive*, al fine di ottenere un unico valore riassuntivo. Questo metodo consente di ricavare la trasmittanza termica attraverso i valori medi di temperatura e di flusso termico calcolati su tutti gli istanti precedenti. In questo modo, partendo dalle tipiche fluttuazioni temporali delle temperature esterne ed interne, è possibile ricavare temperature medie progressive praticamente costanti, flussi termici progressivi praticamente costanti e, conseguentemente, il valore di trasmittanza termica stazionaria della parete. L'equazione utilizzata nel caso di misure eseguite con il termoflussimetro risulta

$$U = \frac{\sum_{j=1}^N q_j}{\sum_{j=1}^N (T_{int,j} - T_{ext,j})}$$

dove q_j è il flusso termico misurato all'istante j -esimo di acquisizione, $T_{int,j}$ è la temperatura dell'aria interna misurata all'istante j -esimo e $T_{ext,j}$ è la temperatura dell'aria esterna misurata all'istante j -esimo.

La procedura di messa in stazione della strumentazione prevede i seguenti passaggi fondamentali:

- Fissare la sonda a piastra alla parete;
- Nel caso di parete liscia fare aderire la piastra alla parete utilizzando del nastro adesivo all'altezza dell'anello di guardia, avendo cura di non coprire il sensore di temperatura posto al centro della piastra (elemento sensibile);
- Nel caso di parete rugosa, utilizzare una pasta termo-conduttiva per migliorare l'adesione alla parete avendo cura di eliminare gli interstizi d'aria;
- Evitare di posizionare la sonda in prossimità di fonti di calore o frontalmente a fonti di calore;
- L'irraggiamento termico della fonte di calore esterna può alterare la misura. Se necessario, interporre uno schermo tra la fonte di calore e la piastra;
- Avviare il programma di registrazione.

Ci sono alcuni accorgimenti da tenere a mente quando vengono effettuate questo tipo di misure. Per una misura corretta occorre rispettare almeno alcuni accorgimenti di base nel posizionamento delle sonde e nelle condizioni di prova. Vale a dire:

- Far aderire bene le sonde alla parete interna;
- Garantire una differenza di temperatura tra interno ed esterno di almeno 15°C;
- Garantire condizioni interne il più possibile costanti nel tempo (ambiente interno climatizzato);
- Posizionare le sonde (interna ed esterna) in luoghi protetti da sorgenti termiche alla stessa altezza delle sonde apposte sulle pareti;
- Per evitare posizionamenti errati è consigliabile effettuare preventivamente un'indagine termografica per evidenziare ponti termici, anomalie e strutture portanti della parete.

Nel calcolo del flusso termico (q) secondo il metodo della resistenza lininare il coefficiente adduttivo (h_{add}) è considerato come una costante. In letteratura gli scambi termici convettivi sono stati ampiamente studiati [34]. In particolare sono state definite correlazioni basate su "somiglianze" con lastre piane (*similarity-based correlations*) [35,36,37,38] e correlazioni sperimentali basate su studi effettuati in camere climatizzate (*experimentally-based correlations*) [39,40,41].

Le correlazioni presenti in letteratura sono legate ai diversi regimi dei moti di fluido che si possono instaurare in prossimità delle pareti. Al fine di comprendere se in prossimità di una parete gli scambi termici convettivi sono naturali o forzati è possibile calcolare il numero di *Archimede* (Ar), espresso dal rapporto tra il numero di *Grashof* (Gr_L) e il quadrato del numero di *Reynolds* (Re).

Il numero di *Grashof* (Gr_L) è un gruppo adimensionale utilizzato in termo-fluidodinamica e caratterizza la trasmissione del calore per convezione naturale. Esso è dato dal rapporto delle forze di galleggiamento e delle forze viscosse di un fluido ed è definito dalla seguente equazione

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_{sup} - T_{\infty})L_c^3}{\nu^2}$$

dove g è l'accelerazione gravitazionale; β è il coefficiente di dilatazione cubica (che per i gas ideali viene definito pari a $1/T_{\text{media fluido-parete}}$); T_{sup} è la temperatura della superficie espressa in °C; T_{∞} è la temperatura del fluido sufficientemente lontano dalla superficie (espressa anch'essa in °C); L_c è la lunghezza caratteristica della superficie espressa in m; ν è la viscosità cinematica.

Il numero di *Reynolds* (Re) è un gruppo adimensionale usato in fluidodinamica, proporzionale al rapporto tra le forze d'inerzia e le forze viscosi ed è definito nel modo seguente

$$Re = \frac{uL_c}{\nu}$$

dove u è la velocità dell'aria, L_c è la lunghezza caratteristica della parete e ν è la viscosità cinematica. Definiti i numeri di Grashof e Reynolds è possibile calcolare il numero di *Archimede* attraverso il seguente rapporto

$$Ar = \frac{Gr}{Re^2}$$

Se $Ar \gg 1$ sono prevalenti fenomeni di convezione naturale. Al contrario, se $Ar \ll 1$ sono prevalenti fenomeni di convezione forzata.

Il numero di Grashof fornisce inoltre il criterio principale per distinguere tra flusso laminare e turbolento in caso di convezione naturale. Ad esempio, per piastre verticali si è osservato sperimentalmente che il numero di Grashof critico è circa pari a 10^9 e, conseguentemente, il regime di moto su una piastra verticale diventa turbolento per numeri di Grashof superiori a 10^9 .

Il coefficiente di scambio termico generico h compare all'interno di un'ulteriore numero adimensionale, ovvero il numero di *Nusselt* (Nu). Le relazioni empiriche semplici per determinare il numero di Nusselt nel caso di convezione naturale si possono ricondurre tutte alla formula

$$Nu = \frac{hL_c}{\lambda} = C \cdot (Gr_L \cdot Pr)^n = C \cdot Ra_L^n$$

dove λ è la conducibilità termica del fluido; C e n sono due costanti (i cui valori dipendono dalla geometria della superficie e dal regime di flusso); Pr è il numero di Prandtl e Ra_L è il numero di Rayleigh. Il regime di flusso diventa quindi esprimibile in termini di valore assunto dal numero di Rayleigh.

Gli scambi termici cui è soggetta una parete, sia sul lato interno che sul lato esterno, sono di tipo adduttivo ovvero scambi termici sia convettivi che radiativi. L'utilizzo simultaneo del termoflussimetro e delle sonde di temperatura superficiale consente di ricavare informazioni preziose per stabilire il contributo dei coefficienti di scambio termico convettivo e radiativo attraverso un'elaborazione dei dati ottenuti dalla strumentazione.

Il termoflussimetro è uno strumento che misura il flusso termico che attraversa la piastra termoflussimetrica applicata sul lato interno della parete. Al tempo stesso, il sensore di temperatura superficiale (posizionato vicino alla piastra termoflussimetrica) registra i valori di temperatura della superficie interna. È noto che il flusso termico scambiato può essere definito nel modo seguente:

$$q = h_{add}(T_{int} - T_{si}) = U(T_{int} - T_{ext})$$

Risulta evidente che dai rilievi strumentali e dall'equazione sopra riportata è possibile ricavare il coefficiente di adduzione interno. Inoltre, la norma UNI 6946 definisce il coefficiente di scambio termico radiativo nel modo seguente:

$$h_{rad} = 4\varepsilon\sigma T_m^3$$

Dove ε è l'emissività della superficie, σ è la costante di Stefan-Boltzmann e T_m è la temperatura termodinamica media della superficie e delle superfici coinvolte nello scambio termico. Il coefficiente di scambio termico convettivo può essere ricavato semplicemente dalla differenza tra il coefficiente di scambio termico adduttivo ed il coefficiente di scambio termico radiativo.

$$h_{conv} = h_{add} - h_{rad}$$

In letteratura sono presenti correlazioni riguardanti gli scambi termici convettivi interni [34]. Tali relazioni sono numerose ed esistono sia per la convezione naturale che per la convezione forzata. Per i casi di studio analizzati, sono state eseguite misure con un anemometro a filo caldo in prossimità della parete ed è stato calcolato il numero di Archimede che ha restituito valori $\gg 1$ (convezione naturale). Le correlazioni testate sono:

- Correlazione di Khalifa e Marshall [41], espressa come

$$h_{conv} = 2.3 \cdot \Delta T^{0.24}$$

Questa espressione riguarda una parete non riscaldata in ambiente riscaldato mediante radiatori sotto finestra o parete riscaldata;

- Correlazione di Churchill e Chu [35], espressa come

$$h_{conv} = \frac{0.0257}{H} (0.825 + 7.01 \cdot \Delta T^{1/6} \cdot H^{3/6})^2$$

È un'espressione considerata valida su tutta la gamma dei numeri di Rayleigh;

- Correlazione di Fohanno e Polidori [38], espressa come

$$h_{conv} = 1.332 \cdot \left(\frac{\Delta T}{H}\right)^{1/4} \rightarrow Ra < 6.3 \times 10^9$$

È valida in regime laminare.

- Correlazione di Alamdari e Hammond [37], espressa come

$$h_{conv} = \left\{ \left[1.5 \left(\frac{\Delta T}{H}\right)^{1/4} \right]^6 + [1.23 \Delta T^{1/3}]^6 \right\}^{1/6}$$

È un'espressione valida per regimi di flusso laminari, di transizione e turbolenti.

Tutte le correlazioni sono funzione del salto termico aria-parete e della lunghezza caratteristica H (ovvero l'altezza della parete).

L'analisi termoflussimetrica non può essere eseguita in maniera casuale su qualunque elemento strutturale di un edificio: è bene che prima di una misura con il termoflussimetro sia eseguita un'analisi termografica della parete per scongiurare la presenza di ponti termici in prossimità della zona di applicazione della piastra termoflussimetrica. È inoltre necessario l'impiego di un anemometro a filo caldo per la misura della velocità dell'aria in prossimità del punto in cui si vuole installare il termoflussimetro. Grazie all'utilizzo dell'anemometro a filo caldo è possibile ricavare

informazioni utili al calcolo del numero di Reynolds e, conseguentemente, del numero di Archimede in base a quanto precedentemente esposto.

Nel calcolo della trasmittanza ricopre un ruolo importante anche il coefficiente convettivo esterno. Gli scambi termici di natura convettiva tra le pareti e l'aria sono stati ampiamente studiati e sono state formulate correlazioni che tengono conto della velocità del vento, della direzione del vento e della rugosità superficiale della parete [42,43,44,45,46,47,48,49,50,51]. Le correlazioni presenti in letteratura sono state impiegate fortemente all'interno dei software di simulazione energetica degli edifici. Considerando la complessità insita nella raccolta di dati, le ricerche scientifiche sperimentali su questo argomento hanno portato ad un gran numero di modelli empirici, molti dei quali implementati nei software di simulazione. I modelli ottenuti possono essere classificati in base agli esperimenti condotti su scala ridotta (*reduced-scale*) o su scala reale (*full-scale*), sottolineando il valore della velocità del vento utilizzato. La Figura 11 mostra schematicamente cinque usuali definizioni utilizzate per la velocità del vento:

- Velocità del vento nel flusso libero (V_f): ovvero la velocità del vento lontano da qualsiasi oggetto, dove quindi il flusso è indisturbato;
- Velocità del vento misurata ad una altezza H' dal tetto dell'edificio (V_R);
- Velocità locale del vento (V_{loc}): ovvero la velocità del vento misurata ad una certa distanza d dalla facciata dell'edificio e ad una certa altezza H dal suolo;
- Velocità del vento misurata ad una quota z dal suolo, all'interno del flusso indisturbato (V_z);
- Velocità del vento misurata a una quota pari a 10 m (tipicamente la quota cui è collocato l'anemometro delle capannine aeroportuali) ed indicata come V_{10} .

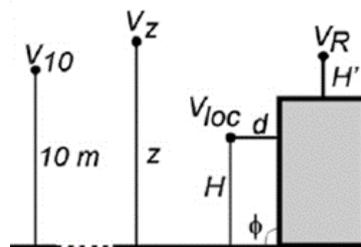


Figura 11. Punti di misura delle velocità del vento [51].

3.3.2 Indagini termografiche

Nel 1864 il fisico *James Clerk Maxwell* fu il primo a teorizzare l'esistenza del fenomeno fisico dell'irraggiamento gettando le basi teoriche della trasmissione del calore per irraggiamento. Maxwell ipotizzò che le cariche accelerate o correnti elettriche variabili nel tempo producono campi elettrici e campi magnetici in rapido movimento, che prendono la forma di onde chiamate onde elettromagnetiche. Maxwell ipotizzò poi che queste onde elettromagnetiche rappresentano l'energia emessa dalla materia in conseguenza dei cambiamenti nelle configurazioni elettroniche degli atomi e molecole. Le onde elettromagnetiche, dette anche radiazione elettromagnetica, hanno la proprietà di trasportare energia durante la loro propagazione, e possono quindi essere considerate come trasportatrici di un insieme di *pacchetti discreti di energia* (e), chiamati da *Max Planck* "fotoni o

quanti". Le onde elettromagnetiche si distribuiscono su uno spettro molto ampio di lunghezze d'onda, variabile tra 10^{-10} μm e 10^{10} μm . Il comportamento delle onde elettromagnetiche differisce in relazione alla lunghezza d'onda di riferimento. La radiazione elettromagnetica che corrisponde alla trasmissione del calore è prodotta da moti vibratorii e rotatori delle molecole di una sostanza. Nei corpi che si trovano a una temperatura superiore allo zero assoluto ($0 \text{ Kelvin} = -273,15 \text{ }^\circ\text{C}$), l'aumento di velocità di questi moti porta all'incremento della temperatura e della radiazione termica emessa. Il campo di lunghezze d'onda che interessa la radiazione termica è piuttosto vasto. Non esiste un unico standard riconosciuto per queste bande ma più convenzioni settoriali nate in differenti campi di ricerca per suddividere le regioni collegate a diverse classi di fenomeni. La radiazione infrarossa si distingue in:

- Infrarosso vicino (*near infrared*);
- Infrarosso onda corta (*short wave*);
- Infrarosso onda media (*medium wave*);
- Infrarosso onda lunga (*long wave*);
- Infrarosso lontano (*far-away infrared*).

La radiazione infrarossa percepita ed utilizzata nella termografia a raggi infrarossi riguarda gli intervalli *short wave* e *long wave*. Si tratta di zone denominate *finestre atmosferiche*, poiché l'atmosfera non è trasparente in modo costante a tutte le lunghezze d'onda dell'infrarosso. Per questa ragione le termocamere sono progettate per rilevare l'energia termica in una delle due finestre in base all'utilizzo prevalente. I sensori *short range* sono impiegati per interventi su superfici ad alta temperatura (ad esempio controllo della combustione di forni); i sensori *long range* sono adatti per le applicazioni edilizie.

Nello studio della trasmissione del calore per irraggiamento si distinguono tre componenti:

- Irraggiamento emisferico o irradiazione (G) di una superficie: rappresenta la potenza termica *incidente* su una unità di superficie;
- Potenza di emissione emisferica (E): rappresenta la potenza termica *emessa* sotto forma di onde elettromagnetiche dall'unità di superficie *verso qualsiasi direzione*;
- Radiosità (J): considera la *somma della potenza radiante rilasciata* da un'unità di superficie, *comprendendo la frazione riflessa e la frazione propriamente emessa dalla superficie*.

Irradiazione: la radiazione incidente su una superficie (G) viene ripartita in una quota assorbita (G_a), una quota trasmessa (G_t) ed una quota riflessa dal mezzo (G_p). Ovviamente la somma dei tre contributi deve essere pari alla radiazione incidente sulla superficie. Il modo in cui la radiazione viene assorbita, trasmessa o riflessa dipende dalle proprietà del corpo ed è definito dai seguenti coefficienti:

- Coefficiente di assorbimento (α): indica la capacità del corpo di assorbire la radiazione infrarossa;
- Coefficiente di trasmissione (τ): indica la capacità del corpo di trasmettere la radiazione infrarossa;
- Coefficiente di riflessione (ρ): indica la capacità del corpo di riflettere la radiazione infrarossa.

La somma dei coefficienti α , τ , ρ deve essere pari al 100% della radiazione totale incidente ($\alpha + \tau + \rho = 1$). Nei corpi opachi la quota trasmessa è considerata nulla ($\tau = 0$) e, pertanto, la radiazione

termica può essere analizzata come un fenomeno superficiale, legato cioè alle caratteristiche e al comportamento della superficie del sistema. Per i corpi opachi la somma dei coefficienti diventa $\alpha + \rho = 1$.

Emissione termica: si è detto che tutti i corpi che si trovano ad una temperatura superiore allo zero assoluto emettono una radiazione elettromagnetica. La radiazione uscente dal corpo (E) si suddivide in tre componenti (Figura 12):

- Radiazione emessa dal corpo (E_ϵ);
- Radiazione riflessa da una sorgente esterna (E_ρ);
- Radiazione trasmessa da una fonte esterna (E_τ).

L'energia totale uscente (E) da una superficie a una data lunghezza d'onda dipende dal materiale, dalla condizione della superficie del corpo e dalla temperatura superficiale del corpo. Per definire l'energia totale uscente dal corpo (E), ricordando che la legge di Kirchoff afferma che l'emissività di una superficie è uguale al coefficiente di assorbimento ($\epsilon = \alpha$), è necessario conoscere le seguenti caratteristiche del corpo stesso:

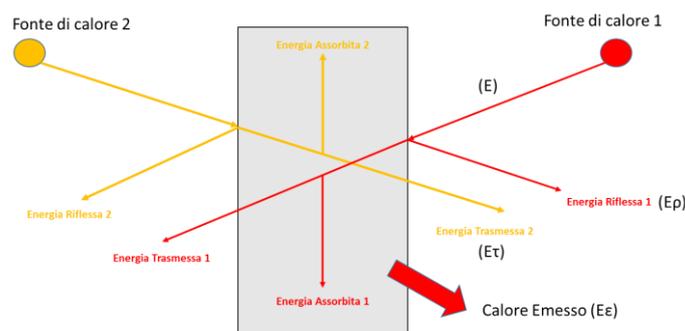


Figura 12. Emissione termica di un oggetto.

- L'*emissività* (ϵ): è un indicatore della capacità di un materiale di emettere (emanare) raggi infrarossi;
- Il *fattore di riflessione* (ρ): è una misura della capacità di un materiale di riflettere i raggi infrarossi;
- Il *fattore di trasmissione* (τ): è una misura della capacità di un materiale di trasmettere (lasciar passare) i raggi infrarossi.

Corpo nero e superfici reali: per misurare la quantità di calore emessa da un oggetto, convenzionalmente è stato fissato come riferimento il cosiddetto *corpo nero* (un modello ideale di trasmissione del calore). Le sue caratteristiche fondamentali sono:

- È un assorbitore ideale di radiazione: ha un coefficiente di assorbimento (α) pari a 1 e coefficienti di riflessione (ρ) e trasmissione (τ) pari a 0;
- È un emettitore diffuso: l'intensità di emissione non dipende dalla direzione.

Il potere emissivo totale del corpo nero (E_n) rappresenta la radiazione termica complessiva emessa dalla superficie nell'intero campo delle lunghezze d'onda e viene definito nel modo seguente:

$$E_n = \sigma T^4$$

Dove σ è la costante di Stefan-Boltzmann e T è la temperatura della superficie (espressa in Kelvin). Tutto è in generale rappresentabile come una composizione di corpi grigi, ovvero corpi che hanno una distribuzione spettrale di energia emessa pari ad una percentuale costante di quella emessa da un corpo nero posto alla stessa temperatura. Pertanto le superfici reali emettono una quantità di energia inferiore rispetto al corpo nero posto alla stessa temperatura. Questa quantità dipende dall'*emissività* (ε) del corpo, ovvero un coefficiente che caratterizza le proprietà ottiche della superficie e indica il rapporto tra la radiazione emessa da un corpo (rilevata secondo una certa direzione) e quella emessa da un corpo nero alla stessa temperatura. Pertanto, l'emissività è data dal rapporto tra l'energia totale emessa da un corpo reale e la radiazione emessa dal corpo nero caratterizzato dalle medesime condizioni di temperatura e lunghezza d'onda. Quindi la legge di Stefan-Boltzmann nel caso di un corpo grigio si trasforma in

$$E_n = \varepsilon \sigma T^4$$

Temperatura riflessa apparente e radiosità: una termocamera misura quindi i raggi infrarossi a onda lunga ricevuti nel suo campo visivo. In base a questi, calcola la temperatura dell'oggetto da misurare. Il calcolo tiene conto dell'emissività (ε) della superficie dell'oggetto di misura e della compensazione della temperatura riflessa (RTC = Reflected Temperature Compensation), entrambe variabili che possono essere impostate manualmente nella termocamera.

La potenza termica scambiata per irraggiamento è fortemente condizionata dalla riflessione del calore proveniente dai corpi circostanti ed incidente sulla superficie dell'oggetto analizzato. Il parametro di riferimento è la *temperatura riflessa apparente* (T_{RIFL}), ovvero la temperatura apparente degli oggetti che vengono riflessi nella termocamera dall'oggetto in analisi. È il parametro che permette di bilanciare la radiazione riflessa dall'oggetto e che viene captata dalla termocamera. L'energia riflessa dai corpi grigi (E_{RIFL}) sull'oggetto dell'indagine è data dalla seguente relazione:

$$E_{RIFL} = \rho \sigma T_{RIFL}^4$$

dove ρ è il coefficiente di riflessione e σ è la costante di Stefan-Boltzmann. Nel caso di un corpo opaco, per la legge di Kirchoff secondo cui la capacità di un corpo di assorbire la radiazione incidente coincide con la sua capacità di emettere energia sotto forma di radiazione ($\varepsilon = \alpha$), si ottiene:

$$E_{RIFL} = (1 - \varepsilon) \sigma T_{RIFL}^4$$

Per misurare la temperatura riflessa di un corpo è possibile utilizzare un metodo piuttosto semplice: è necessario predisporre un foglio di alluminio da cucina prima appallottolato e poi ridisteso. È possibile applicare il foglio di alluminio anche su un pezzo di cartone, l'importante è che la superficie riflettente sia rivolta verso la termocamera. Sulla termocamera si imposta un'emissività pari a 1 e si rileva il valore di temperatura sul foglio di alluminio: quello è il valore della temperatura apparente riflessa in quel punto.

La radiazione totale che abbandona il corpo opaco (J) è determinata dalla somma della radiazione irradiata dal corpo stesso (E_ε) e della radiazione proveniente dai corpi circostanti e riflessa dalla superficie del corpo (E_{RIFL}):

$$J = E_{\varepsilon} + E_{RIFL} = \varepsilon E_n + E_{RIFL} = \varepsilon \sigma T^4 + \rho \sigma T_{RIFL}^4 = \varepsilon \sigma T^4 + (1 - \varepsilon) \sigma T_{RIFL}^4$$

Ogni pixel del rilevatore rappresenta un punto termico che viene mostrato sul display come un'immagine in falsi colori. La *termografia* (misura della temperatura con una termocamera) è un metodo di misura passivo, senza contatto. L'immagine termica mostra la distribuzione della temperatura sulla superficie di un oggetto.

La radiazione registrata dalla termocamera è quindi composta da raggi a onda lunga emessi, riflessi e trasmessi, provenienti dagli oggetti all'interno del campo visivo della termocamera. L'*emissività* (ε) è un indicatore della capacità di un materiale di emettere (emanare) raggi infrarossi e il suo valore, come già accennato, può variare tra 0 e 1 (corpi idealmente neri). Il *fattore di riflessione* (ρ) è una misura della capacità di un materiale di riflettere i raggi infrarossi. Il *fattore di trasmissione* (τ) è una misura della capacità di un materiale di trasmettere (lasciar passare) i raggi infrarossi.

Come mostrato nella Figura 13, i raggi infrarossi registrati dalla termocamera sono quindi composti:

- Dalla radiazione emessa dall'oggetto di misura;
- Dalla riflessione degli oggetti circostanti;
- Dalla trasmissione della radiazione da parte dell'oggetto di misura.

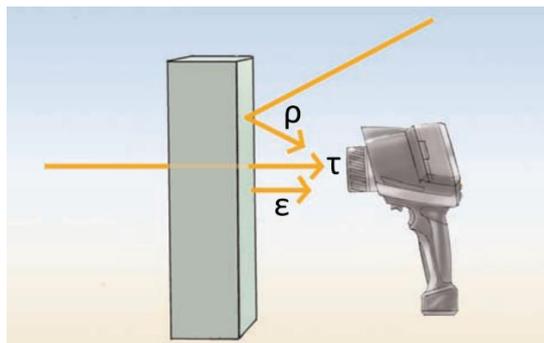


Figura 13. Raggi infrarossi registrati dalla termocamera.

Si assume che la somma di queste parti sia sempre pari a 1 (100%):

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1$$

Poiché la trasmissione raramente è rilevante nella pratica, la trasmissione τ è omessa e la formula

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1$$

è semplificata in

$$\varepsilon + \rho = 1$$

quindi si può anche riscrivere

$$\varepsilon = 1 - \rho$$

Come si può notare osservando l'ultima equazione, quanto minore è l'emissività, tanto maggiore è la quota di raggi infrarossi riflessi, tanto più difficile è effettuare una misura precisa della temperatura

e tanto più importante è che la compensazione della temperatura riflessa (RTC) sia impostata correttamente. Assicurarsi che l'impostazione dell'emissività sia corretta è particolarmente importante se vi sono grandi differenze di temperatura tra l'oggetto di misura e l'ambiente di misura. Se la temperatura dell'oggetto di misura è superiore alla temperatura ambiente:

- Impostazioni di emissività eccessivamente alte determinano letture della temperatura eccessivamente basse;
- Impostazioni di emissività eccessivamente basse determinano letture della temperatura eccessivamente alte.

Con una termocamera si possono misurare soltanto le temperature superficiali; non è possibile guardare dentro qualcosa o attraverso qualcosa. Molti materiali come il vetro, che sono trasparenti all'occhio umano, non sono trasmissivi (permeabili) ai raggi infrarossi a onda lunga. È necessario rimuovere qualsiasi copertura dall'oggetto di misura, altrimenti la termocamera misurerà soltanto la temperatura superficiale della copertura.

Occorre considerare tre variabili per determinare la distanza di misura appropriata e l'oggetto di misura massimo visibile o misurabile:

- Il campo visivo (FOV);
- Il più piccolo oggetto identificabile ($IFOV_{geo}$);
- Il più piccolo oggetto/area di misura misurabile ($IFOV_{meas}$).

Il campo visivo (FOV) della termocamera descrive l'area visibile con la termocamera. Questa è determinata dalla lente usata (Figura 14). Bisogna inoltre conoscere la specifica per il più piccolo oggetto identificabile ($IFOV_{geo}$) dalla termocamera. Questa definisce le dimensioni di un pixel in base alla distanza. Con una risoluzione spaziale della lente di 3,5 mrad (*milliradiani*) e una distanza di misura di 1 m, il più piccolo oggetto identificabile ($IFOV_{geo}$) ha una lunghezza del lato di 3,5 mm e viene mostrato sul display come un pixel (Figura 15).

Per ottenere una misura precisa, l'oggetto di misura deve essere da 2 a 3 volte più grande del più piccolo oggetto identificabile ($IFOV_{geo}$). La seguente regola pratica si applica pertanto al più piccolo oggetto misurabile ($IFOV_{meas}$):

$$IFOV_{meas} \approx 3 \times IFOV_{geo}$$

Il colore di un materiale non produce alcun effetto evidente sui raggi infrarossi a onda lunga emessi dall'oggetto da misurare quando si misura la temperatura con una termocamera. Le superfici scure assorbono maggiormente i raggi infrarossi a onda corta rispetto alle superfici chiare e quindi si riscaldano più velocemente. Tuttavia, i raggi infrarossi emessi dipendono dalla temperatura e non dal colore della superficie dell'oggetto di misura. Un calorifero verniciato di nero, per esempio, emette la stessa quantità di raggi infrarossi a onda lunga di un calorifero verniciato di bianco alla stessa temperatura.

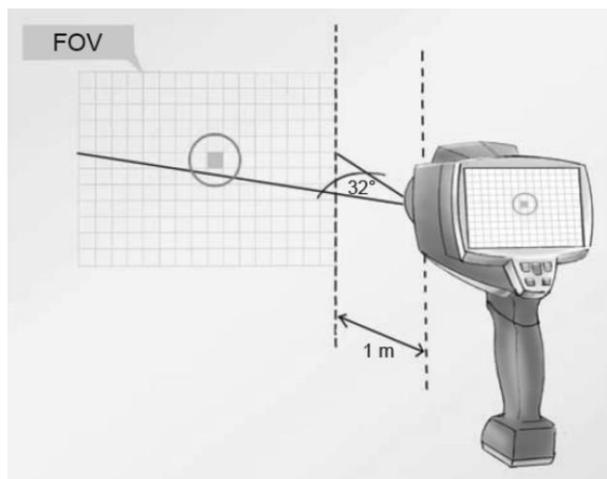


Figura 14. Campo visivo.

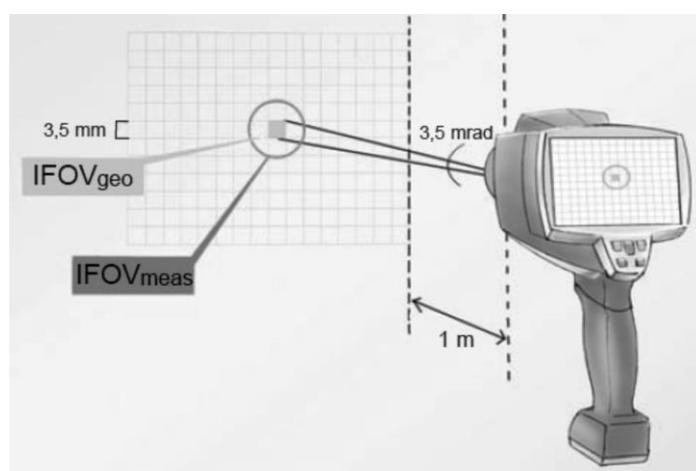


Figura 15. Campo visivo di un singolo pixel.

Occorre considerare l'impostazione della temperatura riflessa (RTC) così come l'impostazione dell'emissività (ϵ), in modo che la termocamera possa calcolare correttamente la temperatura della superficie dell'oggetto di misura. In molte applicazioni di misura, la temperatura riflessa corrisponde alla temperatura ambiente. Questa può essere misurata, ad esempio, con un termometro per la misura della temperatura atmosferica. Un'impostazione precisa dell'emissività è particolarmente importante quando vi è una grande differenza di temperatura tra l'oggetto di misura e l'ambiente di misura. È possibile determinare l'emissività per mezzo di una *misura di riferimento*: la procedura consiste nel misurare anzitutto la temperatura riflessa impostandola nella termocamera, poi misurare la temperatura di superficie dell'oggetto misurato con un termometro a contatto. In seguito occorre misurare la temperatura della superficie dell'oggetto con la termocamera, con un'emissività preimpostata pari a uno. La differenza tra i valori di temperatura misurati con il termometro a contatto e con la termocamera è dovuta al fatto che l'emissività impostata è troppo alta. Abbassando gradualmente l'impostazione dell'emissività potete cambiare la temperatura misurata finché non corrisponde al valore ottenuto nella misura a contatto. L'emissività così impostata corrisponde all'emissività della superficie dell'oggetto di misura.

Il materiale di cui è composto il corpo influenza il valore di emissività superficiale. In linea di massima i metalli hanno un'emissività contenuta mentre tutti gli altri materiali utilizzati in edilizia hanno emissività che variano da 0.80 a 0.96.

4. Sviluppo del progetto di ricerca

4.1 Prima fase del progetto di ricerca

L'indagine esplorativa svolta durante la prima fase del progetto di ricerca ha visto come oggetto diversi casi studio: volendo coprire l'intero panorama edilizio nazionale, costituito da edifici antichi (anche dal particolare valore storico) ed edifici convenzionali, sono state condotte diverse analisi energetiche.

I) Il primo edificio preso in esame è stata un'ex-esattoria dell'800 costruita nel centro Italia. L'edificio è composto da cinque livelli (tre fuori terra e due interrati) ed è costruito, in parte, sul bordo di una collina tufacea (Figura 16). È un edificio caratterizzato da murature massive, con spessori che variano da 10 cm sino a 170 cm. Risulta evidente che in tipologie strutturali come questa il concetto di inerzia termica non possa essere trascurato. Per questo motivo il comportamento dell'edificio è stato simulato attraverso due software: un codice di calcolo quasi-stazionario (software MC11300) ed un codice dinamico (software TRNSYS).



Figura 16. Modello dell'edificio.

Trattandosi di un edificio storico, sul quale vigono vincoli artistico-architettonici, sono stati ipotizzati interventi di efficientamento non invasivi, relativi alle esclusive superfici vetrate. Sono state quindi eseguite 3 simulazioni intervenendo esclusivamente sulle superfici trasparenti (Tabella 6). Sono stati calcolati i fabbisogni energetici annuali e, confrontando i risultati, sono emerse le differenze riportate nella Figura 17.

Tabella 6. Superfici trasparenti testate nei codici.

Superficie trasparente	Spessore [mm]	Trasmittanza termica [W/m ² K]	Fattore di guadagno solare
Vetro singolo	4	5.68	0.855
Vetrocamera-aria	4/16/4	2.83	0.755
Vetrocamera-argon	4/16/4	1.40	0.622

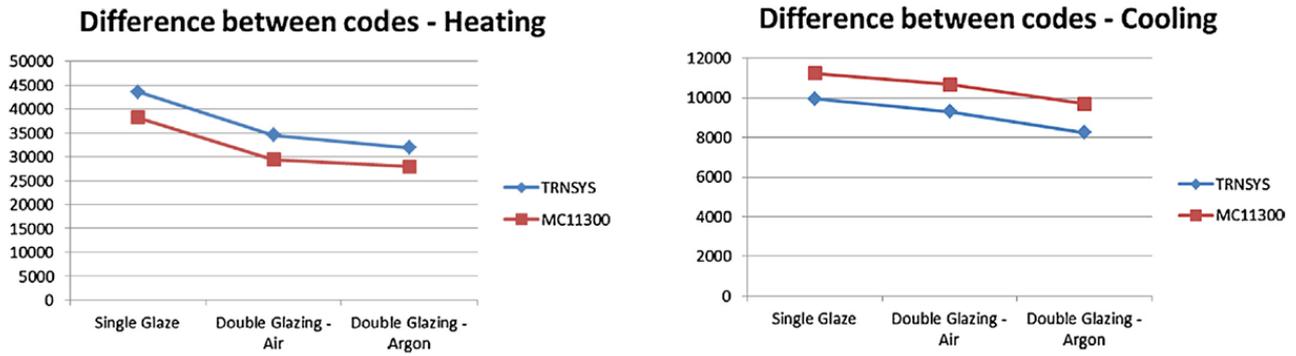


Figura 17. Confronto tra fabbisogni energetici.

In accordo con quanto precedentemente esposto, sono state eseguite alcune campagne di misura presso l'edificio attraverso l'utilizzo dei seguenti strumenti messi a disposizione dal Laboratorio di Fisica Tecnica:

- Termoflussimetro (Figura 18)
- Termocamera (Figure 19 e 20)



Figura 18. Piastra termoflussimetrica.

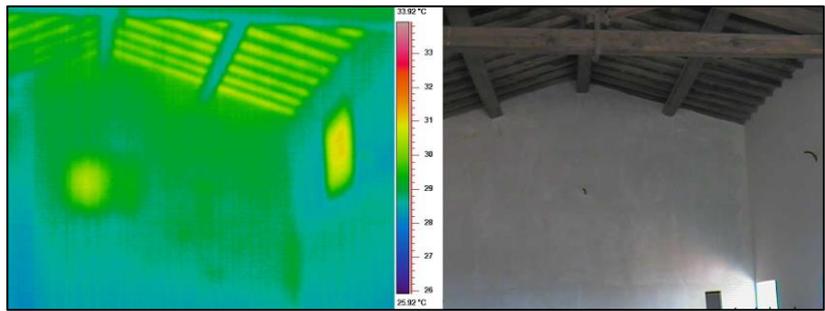


Figura 19. Ponti termici di struttura e tetto debolmente isolato.

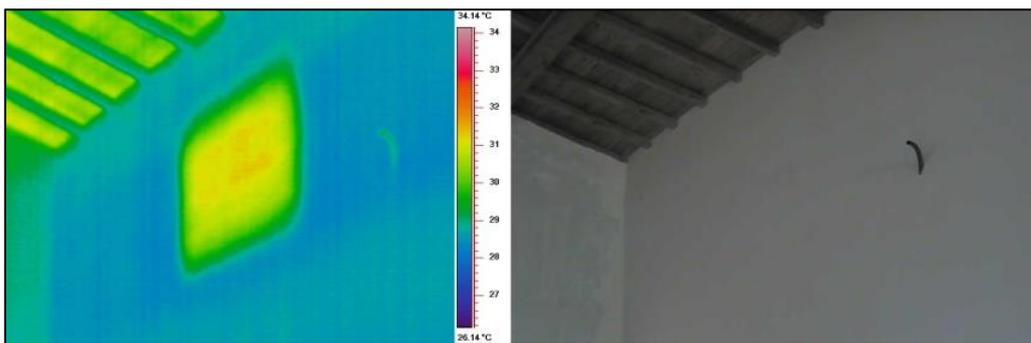


Figura 20. Ponti termici di struttura.

II) Partendo dall'analisi dell'ex-esattoria, è stata poi estesa l'indagine ad un *appartamento convenzionale in condominio* e ad una *villetta* con piano seminterrato, per i quali sono state eseguite le analisi energetiche utilizzando ancora una volta i software MC11300 e TRNSYS. Ciò è stato fatto per continuare ad evidenziare le differenze tra codici quasi-stazionari e dinamici al variare della tipologia edilizia. I risultati ottenuti sono riportati nella Tabella 7.

Tabella 7. Differenze emerse tra i codici.

Edificio		Differenza di kWh (MC11300-TRNSYS)	Scarto Percentuale [%]
Edificio storico	Riscaldamento	-5119	-14.8
	Raffrescamento	2384	25.6
Villetta	Riscaldamento	1242	29.7
	Raffrescamento	114	11.2
Appartamento	Riscaldamento	892	26.6
	Raffrescamento	1796	113.5

Anche in questo caso è evidente che sussistano differenze (anche notevoli) tra i risultati ottenuti con i due codici. Le differenze maggiori riguardano il calcolo dei fabbisogni energetici estivi, periodo durante il quale le oscillazioni termiche e il contributo della radiazione solare sono maggiori.

III) Un ulteriore caso di studio è stato quello di *Villa Blanc* a Roma: la costruzione prende il nome dal Barone Alberto Blanc che l'acquistò nel 1895. La villa è sita nel quartiere Nomentano. La sua estensione totale è di 39000 m². Per questo edificio è stata assegnata a ogni zona termica una propria destinazione d'uso, per un totale di sette destinazioni complessive: aula, biblioteca, corridoio, bagno, entrata, mensa e cucina. In questo caso è stato eseguito un confronto tra due software dinamici: TRNSYS e Design Builder. Elemento fondamentale di quest'analisi è la presenza di due ambienti caratterizzati da superfici vetrate particolarmente estese (che rappresentano quindi ambienti "critici") e la presenza di una folta vegetazione che determina, per i carichi energetici della struttura, un vantaggio durante il periodo estivo e, al tempo stesso, uno svantaggio durante il periodo invernale. In questo caso TRNSYS v.16 mostra una debolezza: ovvero l'impossibilità di modellare la vegetazione eventualmente presente nelle adiacenze di un edificio (con i conseguenti effetti dovuti agli ombreggiamenti). Per tale ragione sono state fatte due analisi. La prima, in assenza di vegetazione, mostrando le differenze tra TRNSYS e Design builder. In seguito, attraverso l'uso esclusivo del Design Builder, è stata valutata l'influenza sui carichi termici della vegetazione.



Figura 21. Villa Blanc, Roma.

Le Figure 22 e 23 mostrano i risultati ottenuti. È possibile osservare come gli scarti fra TRNSYS e Design Builder non siano eccessivi, sfruttando entrambi il metodo delle funzioni di trasferimento.

Scarto Percentuale TRN vs D.B.

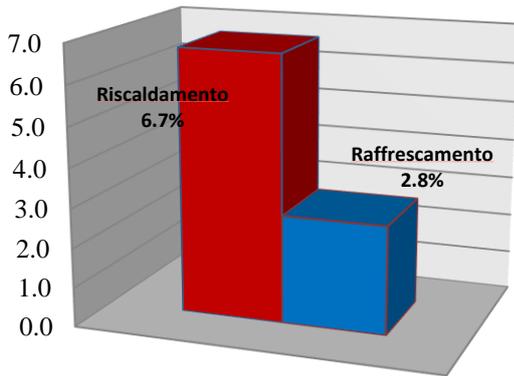


Figura 22. Scarto percentuale TRN vs D.B.

Scarto Percentuale in presenza vegetazione

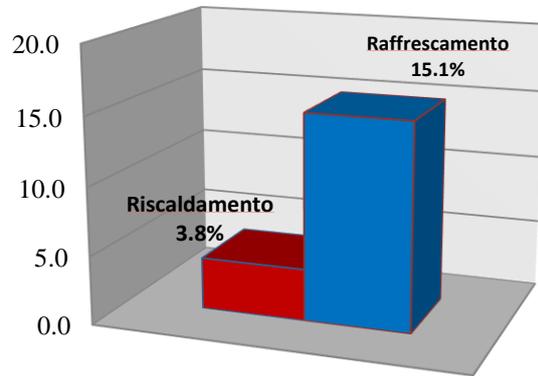


Figura 23. Scarto in presenza di vegetazione.

Gli scarti percentuali mostrati dalla Figura 22 sono riferiti al TRNSYS: il Design builder presenta comunque carichi termici più elevati. Dalla Figura 23, invece, si nota come il carico di riscaldamento aumenti del 3,8% in seguito alla presenza di vegetazione, mentre il carico di raffrescamento presenta una riduzione del 15,1%.

L'analisi in regime dinamico di Villa Blanc è stata parte integrante di uno studio svolto in questa prima fase sulla possibilità di valutare la miglior configurazione impiantistica da installare in un complesso edilizio storico oggetto di restauro e risanamento conservativo. Tale studio ha visto proprio l'uso combinato di strumenti di simulazione dinamica per la definizione dei carichi di picco e il software RETScreen per una valutazione tecnica, economica ed ambientale per un investimento in un progetto ad "energia pulita".

IV) Sono stati condotti studi riguardanti il concetto d'*inerzia termica* delle masse murarie valutando l'incidenza di un codice semplificato rispetto ad un codice dinamico attraverso la costruzione di un edificio elementare, le cui pareti sono costituite da uno strato di calcestruzzo di spessore maggiore e da uno strato isolante che, ipotizzando tre scenari differenti, può essere collocato all'esterno, in mezz'aria e all'interno della parete. Le tre stratigrafie (Figura 24) presentano stessi valori di trasmittanza termica ma la posizione differente dello strato isolante conferisce alla parete un comportamento dinamico diverso.

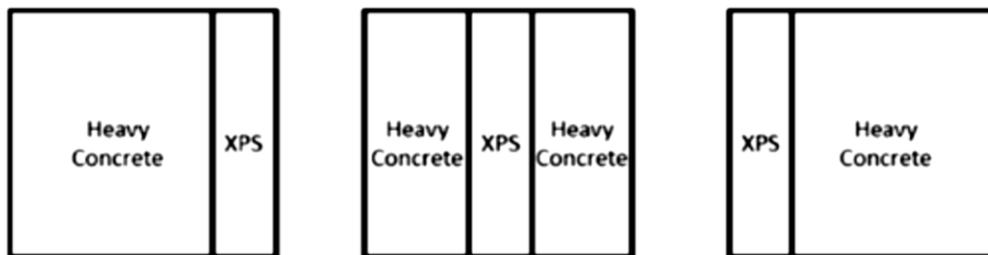


Figura 24. Stratigrafie con configurazioni differenti e stesso valore di trasmittanza termica.

A tal proposito lo strumento più utile si è rivelato TRNSYS, attraverso la possibilità di mappare le variazioni delle temperature superficiali di parete. In tal modo, considerando una cella cubica di prova, è stato possibile comprendere il miglior posizionamento degli strati isolanti rispetto a quelli massivi (Figura 25). Inoltre, è stata testata l'efficacia del posizionamento della parte massiva anche con un codice quasi-stazionario, riscontrando quanto presente in letteratura sull'impossibilità delle

metodologie semplificate di valutare l'inerzia termica degli edifici. Sono riportati nella Figura 25 gli andamenti delle temperature superficiali di parete, relative alle prime 48h di luglio, ottenute con il software TRNSYS. I risultati ottenuti evidenziano come il posizionamento esterno di uno strato di materiale isolante ed il posizionamento interno di elementi massivi rappresenti la soluzione migliore. Le differenze riscontrate (e allineate con quanto presente in letteratura) non risultano evidenti nel caso in cui vengano simulati i fabbisogni energetici con un codice quasi-stazionario. Per il codice semplificato quella che dovrebbe essere la configurazione migliore risulta essere, invece, la peggiore. I risultati del confronto sono riportati nella Figura 26.

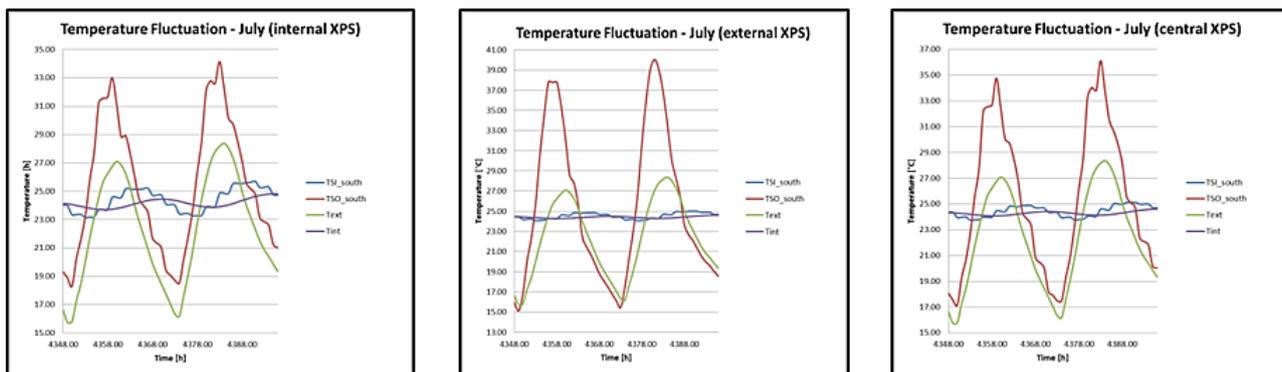


Figura 25. Temperature superficiali di parete relative a tre pacchetti murari caratterizzati da stessa trasmittanza termica ma differente comportamento dinamico.

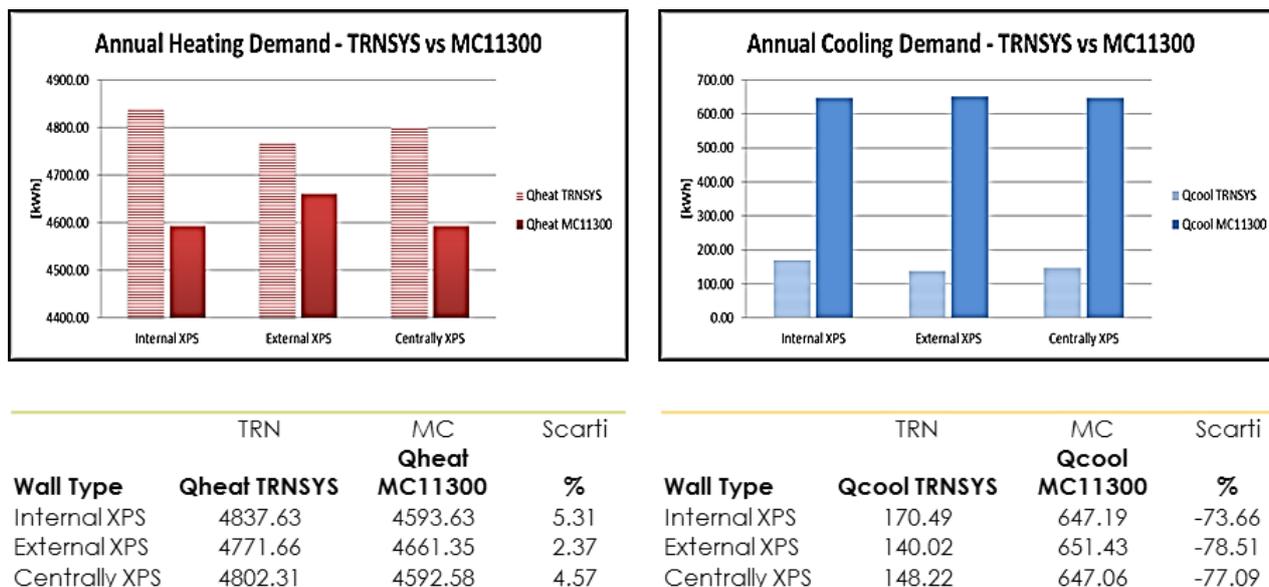


Figura 26. Confronto tra codice quasi-stazionario e dinamico nel valutare il comportamento di parete.

V) È stata poi affrontata l'analisi di un edificio romano degli anni '50 per il quale è stata eseguita una modellazione in regime dinamico, proponendo differenti interventi di riqualificazione energetica. L'influenza di ogni singolo intervento è stata valutata confrontando la richiesta energetica dell'edificio nella situazione di partenza (definita come *caso-base*) e la richiesta a valle dell'intervento simulato. L'edificio è caratterizzato da una struttura a stella, poggiata direttamente al suolo e da 8 livelli. Presenta un vano scale centrale attorno al quale si collocano gli appartamenti. Dalle diagnosi ispettive eseguite, i muri verticali sono costituiti da mattoni forati e calcestruzzo, intonacati su entrambi i lati. Le Figure 27 e 28 mostrano rispettivamente l'edificio (e la sua esposizione) e la stratigrafia dedotta dall'ispezione visiva dei celetti contenenti le serrande. Sono state

inoltre eseguite misure termoflussimetriche e indagini termografiche per comprendere il livello di isolamento dell'involucro, ricercando punti di debolezza (ponti termici).

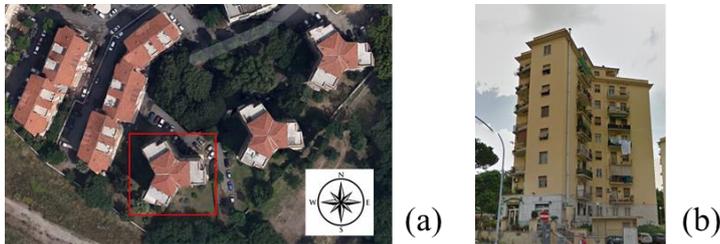


Figura 27. (a) Esposizione dell'edificio;
(b) Configurazione dell'edificio.

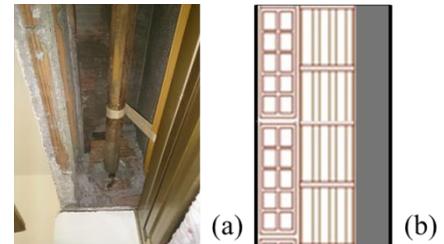


Figura 28. (a) Diagnosi ispettiva;
(b) Stratigrafia.

Come mostrato dalla Figura 29, le misure di trasmittanza sono state fatte a valle di indagini termografiche, utili per scongiurare la presenza di ponti termici in prossimità del punto di misura (punto in cui la piastra termoflussimetrica è stata installata). È stata inoltre monitorata la temperatura interna di un appartamento per acquisire dati utili per la calibrazione del modello.

Le Figure 30 e 31 mostrano invece le immagini termografiche relative all'involucro dell'edificio.

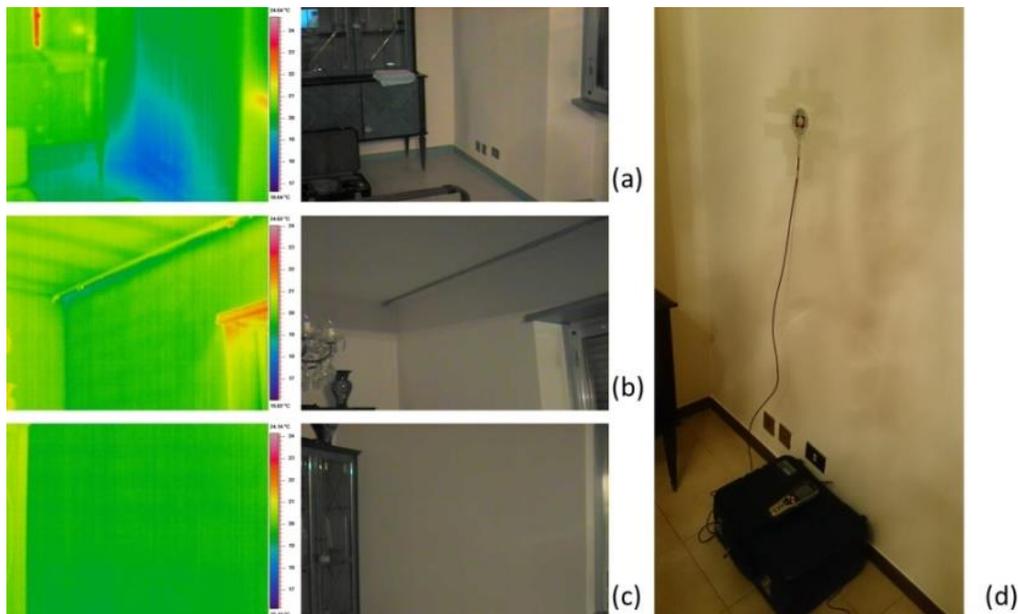


Figura 29. (a),(b),(c) Indagine termografica preliminare; (d) Misura di trasmittanza.

È stata valutata l'incidenza sui fabbisogni energetici annuali della sostituzione dei soli elementi trasparenti e l'installazione di un cappotto esterno di spessore variabile. È stata poi fatta una preliminare indagine sui tempi di ritorno connessi con i più comuni costi d'installazione. Le Tabelle 8 e 9 mostrano rispettivamente le caratteristiche termiche dei vetri testati e la trasmittanza termica raggiunta dagli elementi opachi dopo l'installazione del cappotto.

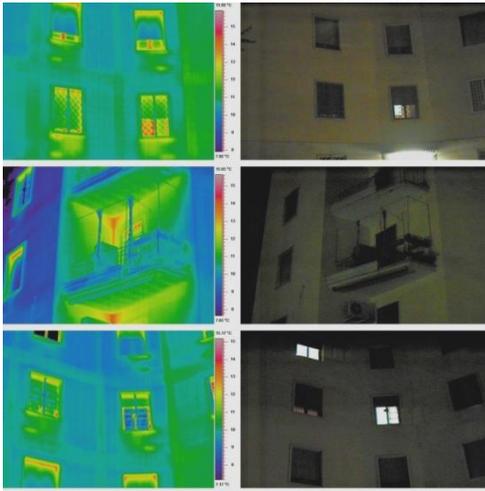


Figura 30. Immagini termografiche dell'involucro.

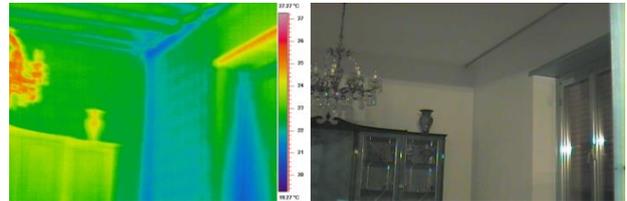


Figura 31. Ponti termici.

La modellazione in regime dinamico è stata fatta con il software TRNSYS e il modello energetico è stato validato attraverso il calcolo del MBE e del CV-RMSE. Inoltre è stato eseguito un confronto tra le condizioni ambientali reali e i dati contenuti all'interno del weather-data del software al fine di poter considerare condizioni al contorno comparabili. Non avendo a disposizione dati certi sugli impianti, è stato considerato un impianto ideale a potenza infinita, caratterizzato dalle temperature di set-point pari a 20°C per la stagione di riscaldamento e 26°C per la stagione di raffrescamento. I risultati sono mostrati nelle Figure 32 e 33.

Tabella 8. Caratteristiche termiche dei vetri testati

	Struttura [mm]	Trasmittanza termica [W/m ² K]	Fattore di guadagno solare
Telaio	-	2.27	-
Doppio Vetro-ARIA	4/16/4	2.83	0.755
Doppio Vetro-ARGON	4/16/4	1.40	0.589
Doppio Vetro-ARIA (Low g)	6/16/4	2.54	0.440

Tabella 9. Trasmittanza termica raggiunta dagli elementi opachi dopo l'installazione del cappotto.

Elemento	Trasmittanza termica [W/m ² K]	Limite raggiunto (zona climatica D)
Tetto isolato – EPS 13cm	0.253	✓
Wall - Coating 2cm	0.629	x
Wall - Coating 4cm	0.478	x
Wall - Coating 6cm	0.386	x
Wall – Coating 8cm	0.324	x
Wall – Coating 10 cm	0.278	✓

L'allineamento tra le temperature simulate e le temperature misurate ha condotto ad un MBE pari a 4.8% ed un CV-RMSE pari a 6% (valori inferiori a quelli limite riportati nelle linee guida ASHRAE). In base al confronto con i valori limite dell'ASHRAE il modello risulta calibrato.

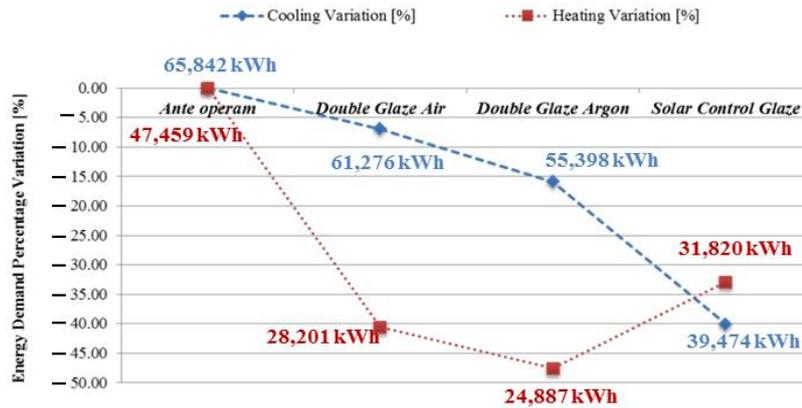
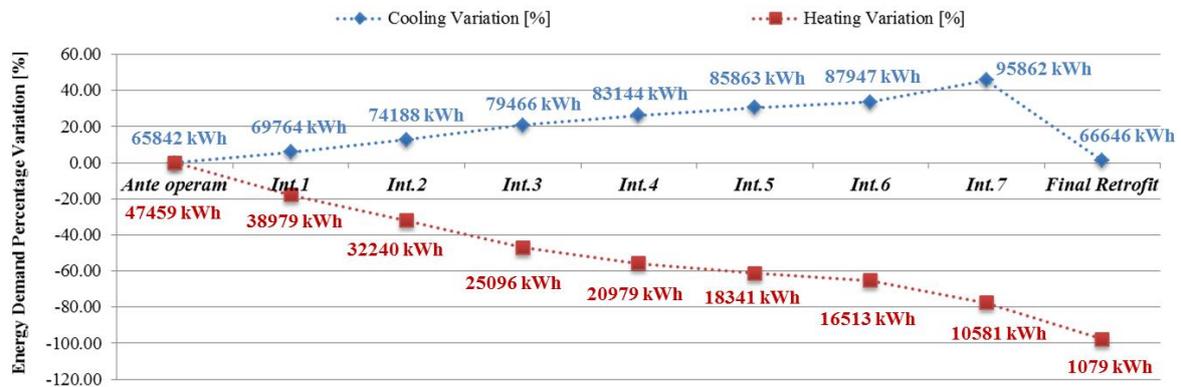


Figura 32. Variazione percentuale dei fabbisogni energetici relative alle sole superfici trasparenti.



Intervento	Descrizione
Ante Operam	Caso base
Int. 1	Tetto isolato – EPS 13cm
Int. 2	Wall - Coating 2cm
Int. 3	Wall - Coating 4cm
Int. 4	Wall - Coating 6cm
Int. 5	Wall – Coating 8cm
Int. 6	Wall – Coating 10cm
Int. 7	Wall (Coating 10cm) + Tetto (EPS 13cm)
Final Retrofit	Wall (Coating 10cm) + Tetto (EPS 13cm) + Doppio Vetro-ARIA (Low g)

Figura 33. Variazione percentuale dei fabbisogni energetici relative agli interventi sulle superfici opache.

Terminata questa prima parte in cui sono stati mostrati i risultati ottenuti dal confronto dei codici di calcolo è possibile dedicare spazio ad un commento dei risultati stessi.

Durante la prima fase sono stati analizzati e confrontati software di simulazione energetica, con l'obiettivo di evidenziare le lacune che l'approccio normativo semplificato porta con sé. A riguardo, sono stati modellati alcuni edifici sia con software quasi-stazionari che con software dinamici e sono stati confrontati i fabbisogni energetici. Si è posta l'attenzione in particolare su edifici storici, caratterizzati quindi da murature massive ad elevata inerzia termica. La variabilità del clima esterno (tenuto in conto dai codici dinamici attraverso weather-data orari) e la capacità di considerare gli accumuli termici delle masse murarie hanno condotto nella totalità dei casi esaminati a fabbisogni energetici differenti. Le differenze riscontrate riguardano essenzialmente la stagione di

raffrescamento per la quale sono state rilevate differenze percentuali in grado di oscillare da circa il 10% sino ad oltre il 100%. Valori così elevati devono immediatamente far pensare ad errori di modellazione. Nei casi esaminati i modelli sono stati controllati più volte e le simulazioni eseguite hanno condotto sempre alle medesime differenze. Le differenze rilevate sono fundamentalmente legate alla capacità dei software dinamici di modellare gli accumuli termici: il calore immagazzinato nelle pareti viene rilasciato durante la notte, quando si verifica il fenomeno dell'*inversione termica*. Ipotizzando di mantenere una temperatura costante negli ambienti interni pari, ad esempio, a 26°C, quando durante la notte le temperature esterne si abbassano scendendo sotto i 26°C, i flussi termici dispersi cambiano verso, dirigendosi dall'interno verso l'esterno. In particolare, tenendo conto del fenomeno di accumulo termico di una parete, il calore immagazzinato dalla parete stessa verrà disperso all'esterno durante la notte, riducendo in questo modo i tempi di funzionamento dell'impianto di raffrescamento.

Attraverso il caso studio di *Villa Blanc* (Roma) è emersa inoltre l'importanza dell'ombreggiamento di una struttura all'interno della simulazione energetica. Se da un lato è importante poter simulare la variabilità del clima e i fenomeni inerziali, dall'altra è importante avere strumenti che siano in grado di simulare i fenomeni di ombreggiamento. Proprio attraverso il caso studio di *Villa Blanc* è emerso che durante la stagione di raffrescamento (quando il contributo della radiazione solare è consistente) la presenza dell'ombreggiamento determina una riduzione del fabbisogno di raffrescamento pari al 15% ed un aumento del fabbisogno di riscaldamento pari a circa il 4%. Software come Design Builder consentono di modellare l'edificio e le aree circostanti attraverso l'interfaccia cad. Altri software come il TRNSYS, non essendo dotati di una interfaccia grafica, possono essere utilizzati insieme ad altri software per la generazione delle ombre e, quindi, delle percentuali di ombreggiamento. Questo modo di utilizzare differenti strumenti di simulazione è stato definito, nel Capitolo 3 *approccio integrato*.

Il concetto relativo all'inerzia termica di un pacchetto murario e come esso viene trattato dalla normativa è stato studiato attraverso la simulazione del comportamento di tre murature: le pareti sono costituite da uno strato di calcestruzzo di spessore maggiore e da uno strato isolante che, ipotizzando tre scenari differenti, può essere collocato all'esterno, in mezzera e all'interno della parete. Le tre stratigrafie, pur presentando stessi valori di trasmittanza termica, sono caratterizzate da un comportamento dinamico diverso. I risultati ottenuti (Figure 25 e 26) evidenziano come il posizionamento esterno di uno strato di materiale isolante ed il posizionamento interno di elementi massivi rappresenti la soluzione migliore. Le differenze riscontrate (e allineate con quanto presente in letteratura) non risultano evidenti nel caso in cui vengano simulati i fabbisogni energetici con un codice quasi-stazionario. Per il codice semplificato quella che dovrebbe essere la configurazione migliore risulta essere, invece, la peggiore.

Non va dimenticato che, oltre allo strumento di simulazione, nella riproduzione virtuale di un edificio, gli strumenti di misura ricoprono un'importanza fondamentale. Durante la prima fase del progetto di ricerca sono stati impiegati strumenti di misura, quali il termoflussimetro e la termocamera a raggi infrarossi. Il termoflussimetro è fondamentale per la misura della trasmittanza termica di pacchetti murari la cui stratigrafia è ignota; la termocamera è fondamentale per l'individuazione di ponti termici nascosti. Le Figure 19 e 20 evidenziano la presenza di finestre tamponate in maniera non efficace: ciò che l'occhio umano non riesce a vedere, può essere osservato attraverso la termografia. L'individuazione dei ponti termici è importante ai fini della simulazione energetica: i ponti termici devono essere modellati tramite i software essendo peculiarità strutturali che influenzano i fabbisogni energetici dell'edificio.

Termoflussimetria e termografia sono state indagini strumentali fondamentali nell'analisi delle possibilità di intervento su un edificio degli anni '50. La termografia ha evidenziato le disomogeneità termiche dell'involucro derivanti da una coibentazione esterna scadente ed è stata fondamentale per la corretta esecuzione dell'analisi termoflussimetrica. Infatti le misure di trasmittanza sono state eseguite a valle di indagini termografiche, utili per scongiurare la presenza di ponti termici in prossimità del punto di misura. Per stimare l'influenza degli interventi sulle superfici trasparenti sulle richieste energetiche annuali, gli elementi elencati nella Tabella 8 del sono stati testati. I risultati mostrati nella Figura 32, riguardante l'intero edificio, consentono di evidenziare gli effetti simultanei di trasmittanze termiche e fattori di guadagno solare differenti. Aumentando progressivamente l'isolamento dalla configurazione "*ante operam*" (lastra singola), è possibile ottenere una riduzione della richiesta di riscaldamento del -40% (vetrocamera aria) o -47% (vetrocamera argon). D'altra parte, il fattore di guadagno solare della finestra gioca un ruolo fondamentale in estate: la Figura 32 mostra che la riduzione della richiesta di raffrescamento raggiunge un valore uguale a -40% utilizzando un vetro a controllo solare. In questo caso, il vetro a controllo solare, rappresentato dalla vetrocamera 6/16/4 con aria, consente quasi di dimezzare il fabbisogno energetico di raffrescamento e, allo stesso tempo, è efficace durante l'inverno. La trasmittanza termica è superiore a quella fornita dalla vetrocamera con argon (vedi Tabella 8), ma, nonostante ciò, permette di ridurre la domanda di energia per il riscaldamento (-31%) rispetto alla situazione di partenza.

Per studiare l'influenza delle superfici opache sulle richieste energetiche annuali, è stato simulato un cappotto esterno costituito da un rivestimento in polistirene espanso. Lo spessore dell'isolante esterno è stato progressivamente aumentato, con conseguente riduzione della trasmittanza termica complessiva. Si è visto che è necessario impiegare almeno 10 cm di spessore di isolante per rispettare il limite di trasmittanza termica imposto dalla normativa italiana (i limiti di trasmittanza termica, per la zona climatica D, sono $0,290 \text{ W/m}^2\text{K}$ per superfici opache verticali e $0,260 \text{ W/m}^2\text{K}$ per quelli orizzontali). L'intervento 7 rappresenta la soluzione migliore per ridurre le dispersioni di calore invernali con una riduzione dell'energia di circa il 78%. Allo stesso tempo, il fabbisogno energetico di raffrescamento aumenta di circa il 45%. Questo accade perché, durante le notti d'estate, quando la temperatura esterna diventa minore della temperatura interna, un isolamento maggiore limita il trasferimento di calore verso l'esterno. Per questo motivo, l'intervento 7 e l'utilizzo del vetro a controllo solare sono stati contemporaneamente simulati per ridurre altresì il fabbisogno di raffrescamento. Utilizzando una vetrocamera con aria (a controllo solare) è possibile ottenere una riduzione della domanda di riscaldamento pari a -98% e un incremento della richiesta di raffrescamento limitata a 1% (Figura 33, *Final retrofit*).

4.2 Seconda fase del progetto di ricerca

Per comprendere la validità dei valori di trasmittanza termica presenti nella Tabella 3 sono state condotte campagne di misura sperimentale con il termoflussimetro. Al tempo stesso, le eventuali anomalie strutturali (ponti termici) non riscontrabili a occhio nudo sono state indagate attraverso l'impiego della termografia. Le indagini termografiche risultano indispensabili per

- Eseguire rilievi di trasmittanza termica esenti da errori indotti proprio dalla presenza di ponti termici nascosti, eventualmente localizzati in prossimità della piastra termoflussimetrica dello strumento;

- Individuare le vulnerabilità dell'involucro edilizio.

Le misure di trasmittanza devono essere eseguite con riferimento alla norma ISO 9869. La norma indica un intervallo minimo di misura di 72 ore. Per tenere in conto gli effetti inerziali delle strutture ed avere misure più affidabili è buona norma allungare i tempi di acquisizione. Per tale ragione le misure effettuate hanno avuto una durata di 10 giorni ciascuna. Le Figure 34 e 35 riportano alcune misure eseguite presso edifici situati nel Lazio.

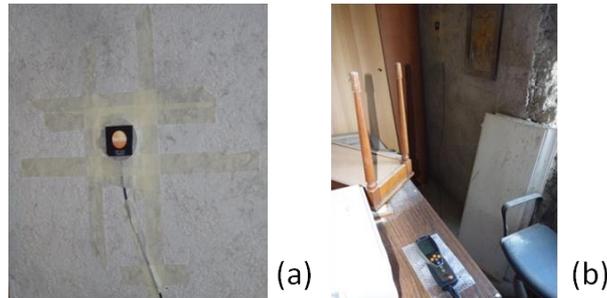


Figura 34. (a) Piastra termoflussimetrica; (b) Datalogger e piastra in acquisizione.

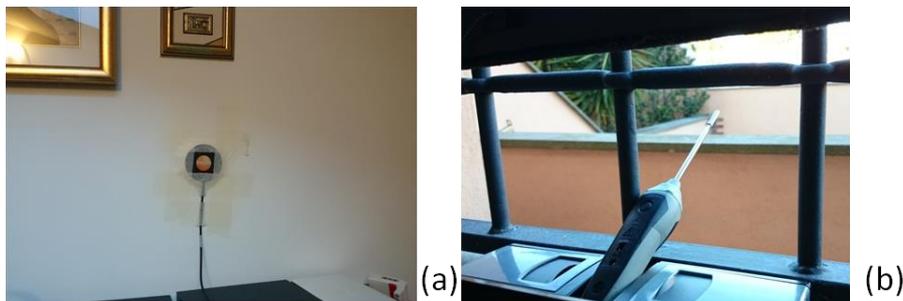


Figura 35. (a) Piastra termoflussimetrica; (b) Sonda temperatura esterna.

Nel caso di un edificio degli anni '50, la trasmittanza misurata è risultata pari a $1.072 \text{ W/m}^2\text{K}$, discordante con il valore presente in Tabella 3, ottenuto tramite il *metodo tabellare*. Confronti di questo tipo danno un'idea di come le norme attualmente vigenti in materia possano non essere molto rappresentative della realtà e condurre a stime errate delle prestazioni e dei fabbisogni energetici. Volendo proporre un semplice calcolo, considerando una parete di estensione pari a 30 m^2 , soggetta ad un salto termico interno-esterno pari a 20°C , qualora venisse calcolata la potenza termica dispersa considerando una trasmittanza pari a $1.39 \text{ W/m}^2\text{K}$, tale potenza risulterebbe maggiore del 30% rispetto alla medesima potenza calcolata sulla base di $1.07 \text{ W/m}^2\text{K}$. In altre parole, assumendo corretto il valore di trasmittanza termica riportato in Tabella 3 per un edificio degli anni '50, si sovrastimerebbe del 30% il flusso termico disperso dall'elemento opaco di estensione pari a 30 m^2 e soggetto ad un salto termico di 20°C .

Per una migliore comprensione delle differenze esistenti tra trasmittanze termiche misurate e calcolate, tre edifici sono stati analizzati durante la seconda fase del progetto di ricerca:

- Caso 1 - un vecchio edificio caratterizzato da pareti in tufo;
- Caso 2 - un edificio degli anni '50 caratterizzato da pareti in mattoni forati e calcestruzzo;
- Caso 3 - una villa degli anni 2000 costruita in mattoni forati intonacati su entrambi i lati.

Le murature analizzate sono descritte nella Tabella 10, all'interno della quale vengono riportati gli strati che costituiscono le pareti e gli spessori.

Tabella 10. Descrizione delle murature.

Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	Spessore [m]		Spessore [m]		Spessore [m]
int	-	int	-	int	-
Intonaco	0.02	Intonaco	0.01	Intonaco	0.01
Blocchi di tufo	0.51	Mattone forato	0.37	Mattone forato	0.30
Intonaco	0.02	Calcestruzzo	0.12	Intonaco	0.01
ext	-	Intonaco	0.01	ext	-
		ext	-		
<i>Spessore totale</i>	<i>0.55</i>	<i>Spessore totale</i>	<i>0.51</i>	<i>Spessore totale</i>	<i>0.32</i>

Sono state calcolate le trasmittanze termiche adottando i valori di conducibilità forniti dalle norme (considerando anche alcuni tipi di calcestruzzo) e sono state confrontate con le trasmittanze termiche misurate tramite un termoflussimetro. I risultati sono riportati nella Tabella 11.

Tabella 11. Trasmittanze termiche calcolate considerando differenti proprietà dei materiali.

Caso 1					
	Descrizione	Conducibilità termica [W/mK]	Conduttanza termica [W/m ² K]	Rs [m ² K/W]	U-value calcolato [W/m ² K]
int	-	-	-	0.13	
Intonaco	Calce e gesso	0.700	-	-	
Blocchi di tufo	Tufo	1.700	-	-	1.897
Intonaco	Calce e gesso	0.700	-	-	
ext	-	-	-	0.04	
Caso 2					
	Descrizione	Conducibilità termica [W/mK]	Conduttanza termica [W/m ² K]	Rs [m ² K/W]	U-value calcolato [W/m ² K]
int	-	-	-	0.13	
Intonaco	Calce e gesso	0.700	-	-	
Mattone forato	Mattone forato	-	0.935	-	
	Calcestruzzo di aggregati naturali	1.263	-	-	0.734
		1.613	-	-	0.745
		2.075	-	-	0.754
	Calcestruzzo di argille espanse	0.325	-	-	0.611
		0.702	-	-	0.695
		0.914	-	-	0.715
	Calcestruzzo cellulare di autoclave	0.168	-	-	0.504
		0.310	-	-	0.604
	Calcestruzzo di inerti vulcanici	0.580	-	-	0.678
Intonaco	Calce e gesso	0.700	-	-	
ext	-	-	-	0.04	
Caso 3					
	Descrizione	Conducibilità termica [W/mK]	Conduttanza termica [W/m ² K]	Rs [m ² K/W]	U-value calcolato [W/m ² K]
int	-	-	-	0.13	
Intonaco	Calce e gesso	0.700	-	-	
Mattoni forati	Mattoni forati	-	1.163	-	0.945
Intonaco	Calce e gesso	0.700	-	-	
ext	-	-	-	0.04	

La Tabella 12 riporta il confronto tra i valori di trasmittanza misurati e calcolati. La tabella mostra inoltre gli scarti percentuali tra i dati ottenuti.

Tabella 12. Confronto fra trasmittanze misurate e calcolate.

Descrizione	Trasmittanza calcolata [W/m ² K]	Trasmittanza misurata [W/m ² K]	Differenza (Calcolata-Misurata) [%]
Caso 1	1.897	0.750	+153
CLS di aggreganti naturali	0.734	1.072	-32
	0.745	1.072	-31
	0.754	1.072	-30
Caso 2	0.611	1.072	-43
	0.695	1.072	-35
	0.715	1.072	-33
CLS cellulare di autoclave	0.504	1.072	-53
	0.604	1.072	-44
CLs di inerti vulcanici	0.678	1.072	-37
Caso 3	0.945	0.810	+17

Durante la seconda fase del progetto di ricerca è stata inoltre indagata l'influenza dei coefficienti di scambio termico convettivo e radiativo sulle superfici interne. Tale indagine è stata eseguita per comprendere il peso dei coefficienti nel caso di misure di trasmittanza attraverso il metodo della resistenza liminare.

Per quanto riguarda gli scambi termici sul lato interno di una parete, vengono riportati i risultati ottenuti in seguito a misure eseguite in un edificio degli anni '50 ed in una villetta costruita nel 2000, entrambi situati a Roma. La Figura 36 mostra una rappresentazione schematica degli edifici e degli ambienti. Entrambi i locali all'interno dei quali sono stati condotti i rilievi strumentali sono riscaldati per mezzo di radiatori.



Figura 36. (a) Edificio degli anni '50; (b) Villetta del 2000.

La Figura 37 si riferisce all'edificio degli anni '50 e mostra gli andamenti nel tempo del:

- Coefficiente adduttivo misurato (definito nella legenda del grafico, per semplicità, come h_{tot_actual});
- Coefficiente adduttivo stabilizzato attraverso il metodo delle medie progressive ($h_{tot_actual_prog}$);
- Coefficiente di scambio termico radiativo ($h_{rad_T^3}$);
- Coefficiente di scambio termico radiativo stabilizzato ($h_{rad_progressivo}$);
- Coefficiente di scambio termico convettivo ricavato per differenza tra l'adduttivo ed il radiativo (h_{conv_actual});
- Coefficiente di scambio termico convettivo stabilizzato (h_{conv_prog});
- Coefficiente adduttivo fornito dalla UNI 6946 ($h_{tot_UNI6946}$);
- Coefficiente di scambio termico convettivo fornito dalla UNI 6946 ($h_{conv_UNI6946}$).

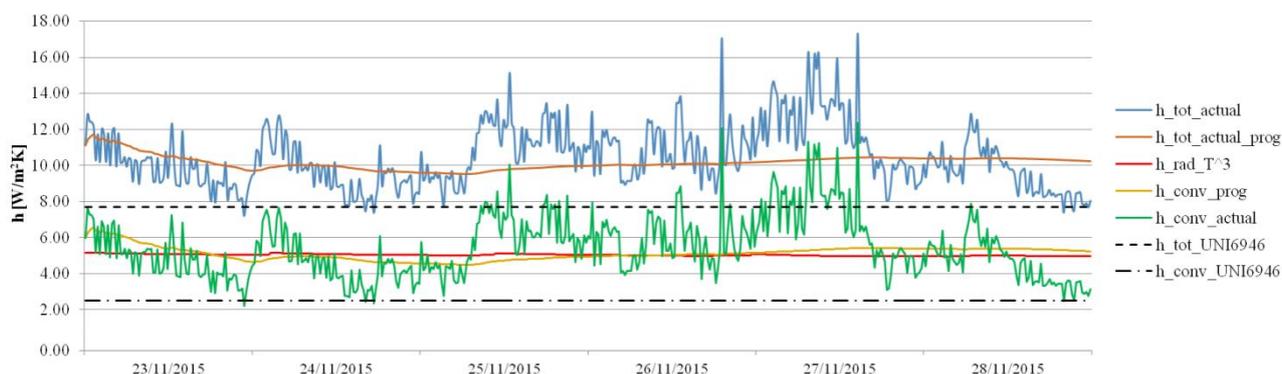


Figura 37. Andamento dei coefficienti di scambio termico (lato interno).

La Figura 38 mostra il confronto tra il coefficiente convettivo “*esatto*” e le correlazioni sopracitate. È possibile ottenere un valore stabilizzato dei coefficienti convettivi attraverso il metodo delle medie progressive. I valori stabilizzati vengono mostrati nella Figura 39, dove è possibile osservare che il valore 2.5 W/m²K (suggerito dalla norma UNI 6946) si colloca a metà strada tra il valore ricavato attraverso l’elaborazione delle misure e le correlazioni.

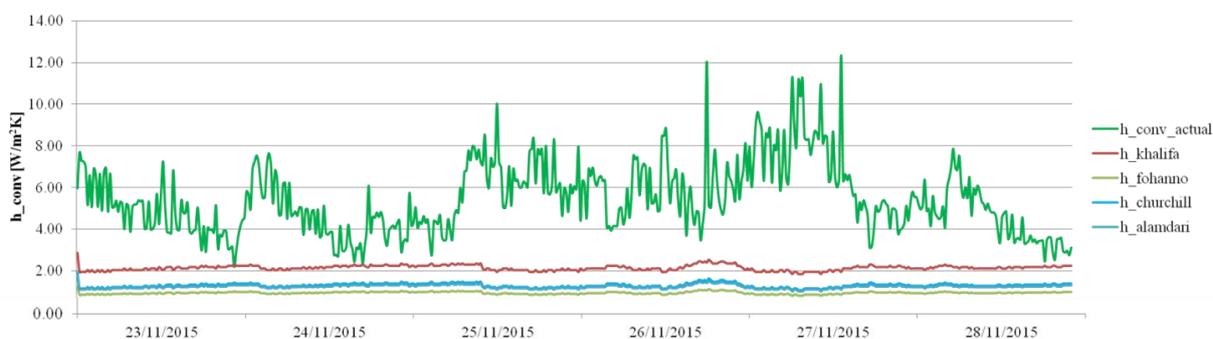


Figura 38. Confronto tra misure e correlazioni teoriche per convezione naturale.

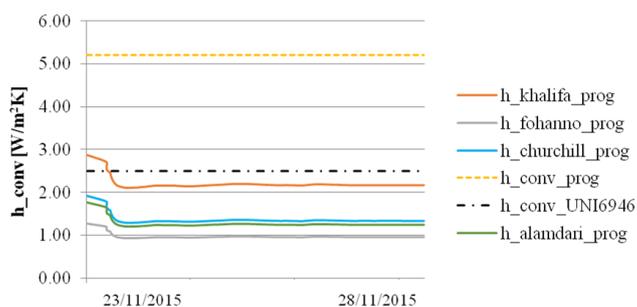


Figura 39. Confronto tra misure e correlazioni teoriche (valori stabilizzati).

La Figura 40 si riferisce all’edificio costruito nel 2000 e riporta gli andamenti nel tempo degli stessi coefficienti elencati precedentemente, nel caso dell’edificio degli anni ’50. Per semplicità i risultati relativi ai coefficienti convettivi stabilizzati e alla loro incidenza sui valori consecutivi di trasmittanza termica sono riportati nelle Tabelle 13 e 14. È possibile osservare che il valore 2.5 W/m²K (suggerito dalla norma UNI 6946) è molto vicino al valore ottenuto tramite l’utilizzo della correlazione di Khalifa e Marshall. In questo caso, differentemente da quanto mostrato per l’edificio degli anni ’50, il coefficiente convettivo “*esatto*” assume un valore ampiamente inferiore a quello suggerito dalla

norma e ai valori ricavati con le correlazioni. In questo caso, la correlazione più vicina al valore “esatto” risulta essere quella di Fohanno e Polidori.

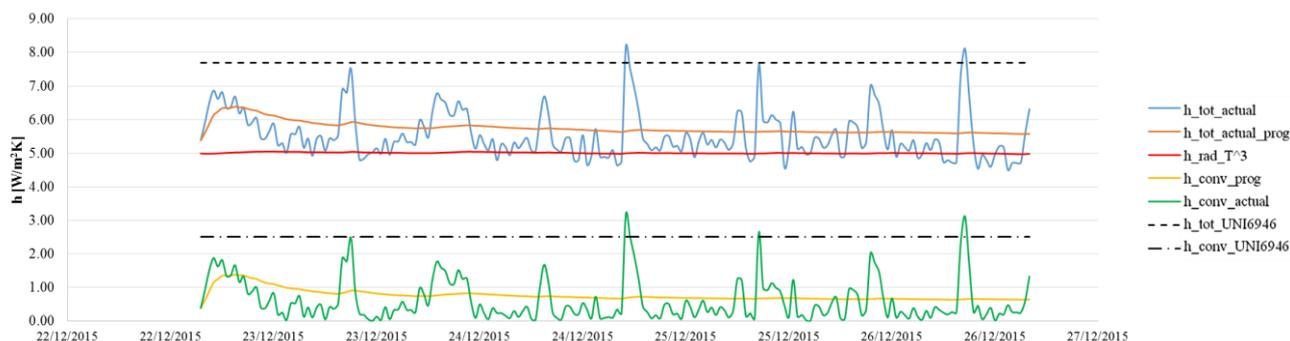


Figura 40. Andamento dei coefficienti di scambio termico (lato interno).

Tabella 13.

	UNI EN ISO 6946			Da misure			Da correlazioni			
	h-rad [W/m²K]	h-conv [W/m²K]	h-tot [W/m²K]	h-tot [W/m²K]	h-rad [W/m²K]	h-conv [W/m²K]	h-khalifa [W/m²K]	h-fohanno [W/m²K]	h-churchil [W/m²K]	h-alamdar [W/m²K]
Edificio '50 Villetta	5.19	2.5	7.69	10.24	5.02	5.22	2.17	0.95	1.34	1.25
	5.19	2.5	7.69	5.57	5.01	0.56	2.38	1.05	1.51	1.41

Tabella 14.

	Trasmittanze termiche					
	Piastra termoflussimetrica	UNI EN ISO 6946	Khalifa and Marshall	Fohanno and Polidori	Churchill and Chu	Alamdari and Hammond
Edificio '50 Villetta	0.845	0.631	0.591	0.490	0.522	0.514
	0.687	0.947	0.911	0.746	0.803	0.791

Terminata questa seconda parte di cui sono stati mostrati i risultati, è possibile dedicare spazio ad alcuni commenti.

Si è visto che durante la seconda fase sono state eseguite campagne di misura sperimentali su pacchetti murari di edifici risalenti a periodi storici differenti. Sono state fatte indagini ispettive per comprendere la stratigrafia interna, eseguendo sopralluoghi durante le fasi di ristrutturazione degli edifici. Nei casi in cui non è stato possibile ispezionare in prima persona i pacchetti murari, sono state raccolte informazioni dagli occupanti o da documentazione tecnica (quando disponibile). La raccolta dati è stata utile per confrontare l’attendibilità delle informazioni ottenute da terzi e per valutare lo scostamento derivante dal confronto tra la valutazione delle performance attraverso un’analisi termoflussimetrica e l’associazione di determinate proprietà termiche consultando le norme UNI 10351 e UNI 10355. La norma UNI 10351 fornisce valori di conducibilità e conduttanza termica dei principali materiali da costruzione, utilizzabili quando non è possibile ottenere informazioni direttamente dalle schede tecniche dei prodotti. Partendo da queste informazioni, è possibile scegliere tra molte categorie per ogni singolo materiale, caratterizzate da differenti caratteristiche termiche. Tali differenze tra proprietà termiche comportano differenze corrispondenti del valore di trasmittanza termica, che possono influenzare in modo significativo la fase di progettazione di un nuovo edificio o la fase di riqualificazione. D'altra parte, considerando edifici esistenti, sono necessarie informazioni affidabili su ogni singolo strato della parete analizzata. Nella maggior parte dei casi, in assenza di

documentazione tecnica affidabile, la stratigrafia viene dedotta in base all'anno costruzione. Inoltre, la procedura semplificata di certificazione energetica di un edificio utilizza esclusivamente il valore di trasmittanza termica, trascurando le informazioni sulla densità di massa e calore specifico dei materiali costituenti le pareti. Con riferimento ai casi studio riportati nella Tabella 10, la trasmittanza termica è stata calcolata attraverso le proprietà termiche dei materiali forniti dalle norme. I casi 1 e 3 sono caratterizzati da un singolo valore, perché la norma indica che il tufo ha una conducibilità termica pari a 1.7 W/mK e mattoni forati, caratterizzati da uno spessore pari a 30 cm, hanno una conduttanza termica pari a 1.163 W/m²K. La parete del caso 2 (Tabella 10) è composta da mattoni forati e calcestruzzo. I mattoni forati (con uno spessore di 37 cm) hanno un solo valore di conduttanza termica pari a 0.935 W/m²K ma per il calcestruzzo la UNI 10351 fornisce numerosi valori di conducibilità termica. Tutte le pareti sono intonacate su entrambi i lati ma, trattandosi di piccoli spessori, il tipo di intonaco non influenza significativamente i risultati (anche per gli intonaci la norma offre svariati valori di conducibilità in base al tipo di intonaco come mostrato nella Tabella 4).

Con riferimento ai risultati riportati nella Tabella 11, il Caso 1 è caratterizzato dalla massima differenza percentuale, pari a +153%. Probabilmente, in questo caso, la parete è realizzata con diversi materiali interni che non sono rilevabili mediante un'ispezione visiva. Un'altra possibilità è che il valore della conducibilità termica del tufo possa essere molto diverso da quello suggerito dalla norma, data l'ampia gamma di valori che sono stati misurati per questo materiale [54]. Il Caso 2 mostra differenze percentuali che vanno da -53% a -30%, con un valore medio pari a -37%. Il Caso 3 presenta il disadattamento più piccolo, pari a +17%. Quando non abbiamo dati certi derivanti dalle schede tecniche dei prodotti, il modello di un muro caratterizzato da una semplice stratigrafia (come ad esempio il caso 3) riduce le variazioni indotte dalla scelta dei materiali. La parete analizzata nel caso 3 è composta da mattoni forati aventi uno spessore pari a 30 cm, intonacati da ambo i lati. Solitamente, gli strati d'intonaco sono caratterizzati da spessori molto piccoli rispetto alle dimensioni della parete, rendendo l'influenza dell'intonacatura sulla trasmittanza termica di parete trascurabile. La conduttanza termica dei mattoni forati, secondo lo standard, è funzione dello spessore, che riduce di conseguenza la variazione del valore di trasmittanza predetto. Per questo motivo, la variabilità dei valori di trasmittanza termica complessiva è ridotta. D'altra parte, come si può vedere nel caso 2, una vasta selezione senza informazioni affidabili può portare ad errori di modellizzazione che comportano differenze percentuali elevate tra modelli e realtà. Tuttavia, anche una semplice stratigrafia può portare a risultati non corretti, come ad esempio nel caso 1. Qui, il valore conducibilità termica del tufo è apparentemente sovrastimato. Tuttavia, è possibile che la parete analizzata sia costituita da altri materiali non rilevati dall'indagine ispettiva e dalle immagini termografiche.

Per confrontare la conducibilità termica fornita dalla norma con il valore associato alla misura di trasmittanza, è possibile determinare la conduttività termica dello strato principale utilizzando l'equazione per il calcolo della trasmittanza termica e assumendo per i sottili strati di intonaco una conducibilità termica pari a quella indicata nella Tabella 11. Per il Caso 1, il calcolo fornisce un valore della conducibilità termica del tufo (strato principale) pari a 0,461 W/mK. Questo valore è molto inferiore a quello previsto dalla normativa, ma è comunque entro l'intervallo di valori sperimentalmente verificato per il tufo da [54]. Analogamente, la conducibilità termica effettiva dello strato principale del Caso 3 risulta essere 0,289 W/mK, che è in questo caso molto più vicina al valore fornito dalla norma.

Inoltre, durante la seconda fase del progetto sono state fatte analisi in merito agli scambi termici convettivi tra l'aria e le superfici interne delle pareti. La norma ISO 6946 suggerisce valori in base alla direzione del flusso termico, ma in letteratura sono presenti numerose correlazioni, dipendenti

dal salto termico aria-superficie, dalla lunghezza caratteristica della parete analizzata e dal sistema di climatizzazione adottato. Il confronto tra i coefficienti convettivi ricavati dall'elaborazione delle misure e quelli ottenuti attraverso le correlazioni è stato fatto poiché in assenza di un termoflussimetro, la trasmittanza può essere ricavata attraverso il *metodo delle resistenze liminari*. Applicando questo metodo (utilizzabile in assenza di una piastra termoflussimetrica), è sufficiente misurare la temperatura dell'aria interna, la temperatura superficiale interna della parete e, infine, la temperatura dell'aria esterna. Il flusso termico viene ricavato imponendo il coefficiente di scambio termico adduttivo suggerito dalla norma UNI 6946, pari a $7.69 \text{ W/m}^2\text{K}$. Tale valore può essere direttamente impostato nello strumento e può essere modificato liberamente dall'utente. È evidente che a priori è impossibile impostare arbitrariamente un nuovo valore corretto. Per tale motivo, sono state valutate le differenze ottenibili tra l'uso della piastra termoflussimetrica (misura effettiva del flusso) e l'utilizzo di una correlazione (flusso ricavato per mezzo del coefficiente adduttivo impostato nello strumento). Dalle misure eseguite è possibile affermare che i coefficienti radiativi ottenuti per mezzo dell'equazione $h_{rad} = 4\varepsilon\sigma T_m^3$ assumono valori molto vicini al valore suggerito dalla normativa. Al contrario, i coefficienti convettivi ricavati dall'elaborazione delle misure assumono valori profondamente diversi dai $2.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ riportati nella norma. È evidente come l'utilizzo di un valore costante nel tempo sia decisamente poco rappresentativo di un fenomeno fortemente dinamico.

4.3 Terza fase del progetto di ricerca

La terza fase del progetto di ricerca ha riguardato la messa a punto di una metodologia per l'individuazione di *parametri termici equivalenti* di stratigrafie sconosciute, mediante l'impiego di strumenti di misura e di un codice di calcolo dinamico. Attraverso l'impiego dell'analisi termoflussimetrica è possibile ottenere la trasmittanza termica di una parete. Quindi, attraverso il valore misurato di trasmittanza è possibile ricavare in maniera piuttosto semplice la conducibilità termica equivalente di una struttura: conoscendo lo spessore della parete oggetto di analisi è possibile imporre l'analogia elettrotermica attraverso la serie di tre resistenze termiche: una resistenza riguardante gli scambi termici adduttivi interni, una resistenza di parete e, infine, una resistenza rappresentativa degli scambi termici adduttivi esterni (Figura 41).

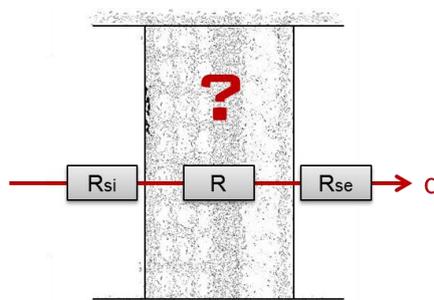


Figura 41. Schema elettrico per ricavare la conducibilità termica equivalente di parete.

Imponendo i valori delle resistenze superficiali così come sono indicati dalla normativa, è possibile ricavare la conducibilità termica equivalente di parete tramite il rapporto tra lo spessore complessivo di parete (s_{parete}) e la sua conducibilità termica complessiva ($\lambda_{equivalente}$).

$$U = \frac{1}{R_{si} + R_{parete} + R_{se}} = \frac{1}{R_{si} + \frac{s_{parete}}{\lambda_{equivalente}} + R_{se}}$$

$$\lambda_{equivalente} = \frac{s \cdot U}{1 - R_{se}U - R_{si}U}$$

Nel momento in cui all'utilizzo del termoflussimetro viene abbinato l'utilizzo di sonde di temperatura superficiale, è possibile ottenere come informazione ulteriore l'evoluzione nel tempo delle temperature superficiali di parete. Le variazioni di tali temperature sono rappresentative del comportamento dinamico del pacchetto murario: le onde termiche, interna ed esterna, sono tra loro correlate ed influenzate non tanto dal singolo valore della densità dei materiali e dal singolo valore del calore specifico, bensì dal loro prodotto. Quanto appena affermato è stato provato attraverso l'impiego del software di simulazione dinamica TRNSYS, attraverso il quale è stata ipotizzata una stratigrafia semplice (un singolo strato) per la quale sono state mappate le temperature superficiali interna ed esterna, ipotizzando di forzare la parete con un'onda termica sinusoidale (caratterizzata da un periodo di 24 ore, valor medio pari a 25 °C e semi ampiezza pari a 10 °C). La parete di partenza è una parete composta da un singolo strato di materiale avente le proprietà termiche riportate nella Tabella 15.

Tabella 15. Proprietà termiche materiale "generico".

Materiale	Spessore [m]	Conducibilità [W/mK]	Calore Specifico [J/kgK]	Densità [kg/m³]
Generico	0.20	0.72	1000	1800

Nella fase iniziale è stata valutata l'influenza delle singole proprietà termiche per comprendere il peso della variazione della conducibilità termica, della densità e del calore specifico. La Figura 42 mostra i risultati ottenuti in termini di oscillazione delle temperature superficiali interne.

Dalle immagini è possibile osservare come una variazione della conducibilità termica (da 0.52 W/mK a 0.82 W/mK) non comporti variazioni consistenti in termini di sfasamento e attenuazione dell'onda termica sul lato interno della parete. Al contrario, una variazione del calore specifico (da 200 J/kgK a 1400 J/kgK) comporta una variazione consistente nel comportamento dinamico della parete. In particolare, dalla Figura 41 è possibile osservare che valori più bassi del calore specifico comportano una fluttuazione maggiore delle temperature sul lato interno della parete, nonché uno sfasamento temporale (in altre parole la parete caratterizzata da valori più bassi del calore specifico riesce a filtrare in modo meno efficace l'onda termica). Infine, è possibile osservare che anche un cambiamento della densità (da 600 kg/m³ a 1800 kg/m³) implica una variazione nel comportamento dinamico della parete (certamente meno evidente rispetto all'effetto derivante da una variazione del calore specifico, ma pur sempre esistente).

Quanto appena detto può essere quantificato attraverso il calcolo dello sfasamento (espresso in ore) e dell'attenuazione dell'onda termica nei vari casi d'indagine. La Figura 43 mostra proprio gli sfasamenti e le attenuazioni al variare dei parametri termici del materiale.

Dalle simulazioni condotte è emerso che la densità ed il calore specifico del materiale sono tra loro correlati: ciò che conta nella definizione del comportamento dinamico della parete è il *prodotto tra la densità ed il calore specifico*. Il valore assunto dalla conducibilità termica del materiale che compone la parete assume un ruolo secondario, influenzando in maniera meno evidente il

comportamento nel tempo del pacchetto murario. In altri termini, è possibile associare a densità e calore specifico qualsiasi valore purché il loro prodotto rimanga costante.

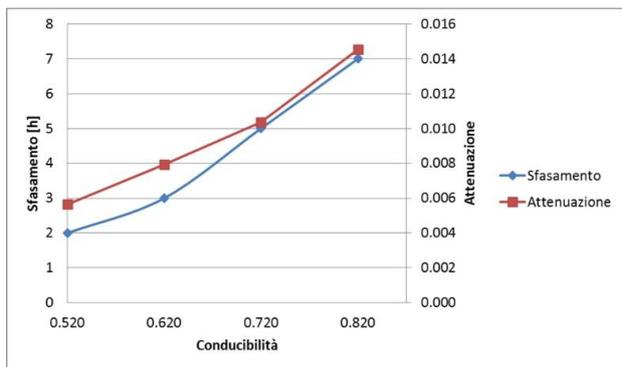
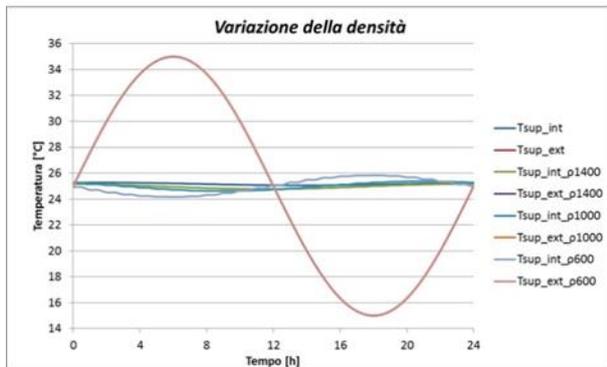
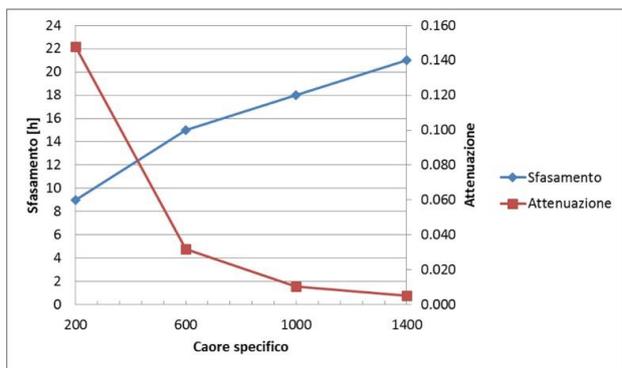
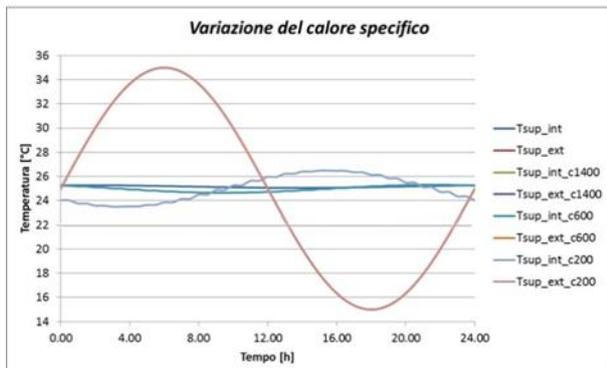
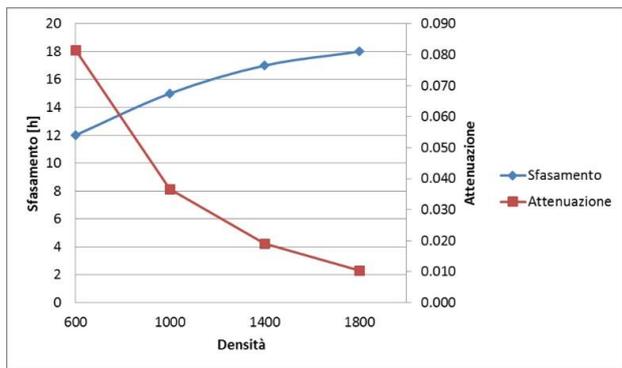
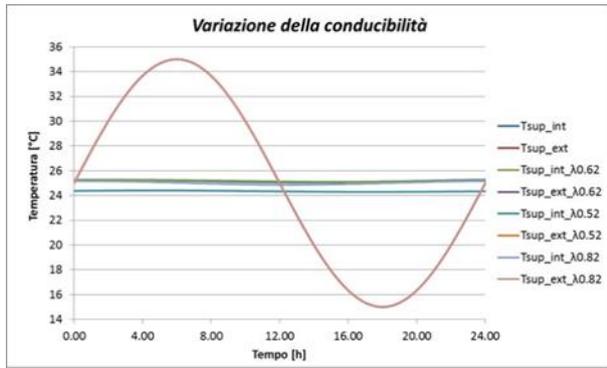


Figura 42. Influenza della variazione dei parametri termici sulle temperature superficiali interne.

Figura 43. Sfasamenti e attenuazioni al variare dei parametri termici.

In tal senso sono state eseguite delle simulazioni i cui risultati hanno condotto alle curve riportate nella Figura 44, dove è possibile osservare una serie di sinusoidi, sia sul lato esterno che sul lato interno, sovrapposte tra loro. Tale posizione evidenzia proprio l'indipendenza dai singoli valori della densità e del calore specifico e una dipendenza dal prodotto tra le due proprietà termiche del materiale. Sono state simulate le temperature superficiali considerando i valori riportati nella Tabella 16.

Quanto appena descritto si lega perfettamente con il concetto di incertezza relativa all'assegnazione di precisi parametri termici ai materiali che compongono i pacchetti murari. È stato già detto che la normativa in molti casi offre un insieme di valori per una singola categoria di materiale. Sta dunque a chi analizza le stratigrafie riconoscere i materiali e assegnare determinati valori di conducibilità, densità e calore specifico. Attraverso il simulatore dinamico sono stati considerati alcuni pacchetti murari ai quali sono stati associati comportamenti termici differenti dovuti a scelte completamente differenti di proprietà termiche. Le Tabelle 17 e 18 mostrano le stratigrafie di due pacchetti murari

differenti, caratterizzati da proprietà che sono state definite, per semplicità, *minime e massime*. La Figura 45 mostra le differenze riscontrate durante un periodo invernale ed estivo tra le temperature superficiali, considerando proprio la variabilità delle suddette proprietà (che nella Figura 45 vengono indicate con *MAX* e *MIN*). Poiché le differenze tra le temperature superficiali possono fornire una non chiara descrizione dell'incidenza della variabilità delle proprietà termiche sugli edifici, sono stati simulati i fabbisogni energetici annuali (riscaldamento e raffrescamento) ipotizzando di avere una parete di 20 m² esposta a Nord. I valori ottenuti vengono riportati attraverso gli istogrammi delle Figure 46 e 47.

Tabella 16. Prodotto tra densità e calore specifico.

Densità [kg/m ³]	Calore specifico [J/kgK]	Prodotto "Densità x Calore specifico" [J/m ³ K]
1800	1000	1800000
1285	1400	~1800000
3000	600	1800000
9000	200	1800000
1000	1800	1800000

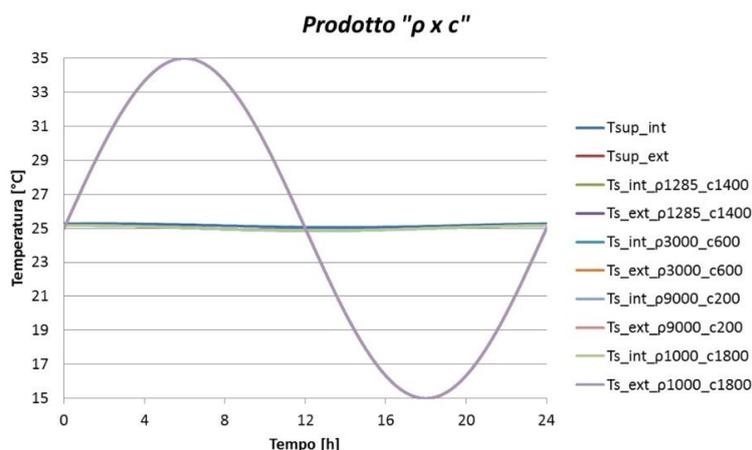


Figura 44. Temperature superficiali tracciate sulla base del prodotto tra densità e calore specifico.

Tabella 17. Valori minimi/massimi delle proprietà termiche.

	Spessore [m]	λ min [W/mK]	ρ min [kg/m ³]	c min [kJ/kgK]	λ max [W/mK]	ρ max [kg/m ³]	c max [kJ/kgK]
Intonaco	0.02	0.180	600	1	1	1800	1
Mattoni pieni	0.38	0.364	600	0.84	0.992	2000	0.84
Intonaco	0.02	0.180	600	1	1	1800	1

Tabella 18. Valori minimi/massimi delle proprietà termiche.

	Spessore [m]	λ min [W/mK]	ρ min [kg/m ³]	c min [kJ/kgK]	λ max [W/mK]	ρ max [kg/m ³]	c max [kJ/kgK]
Intonaco	0.02	0.180	600	1	1	1800	1
Mattoni pieni	0.38	0.364	600	0.84	0.992	2000	0.84
Polistirene espanso	0.05	0.033	35	1.45	0.056	10	1.45
Intonaco	0.02	0.180	600	1	1	1800	1

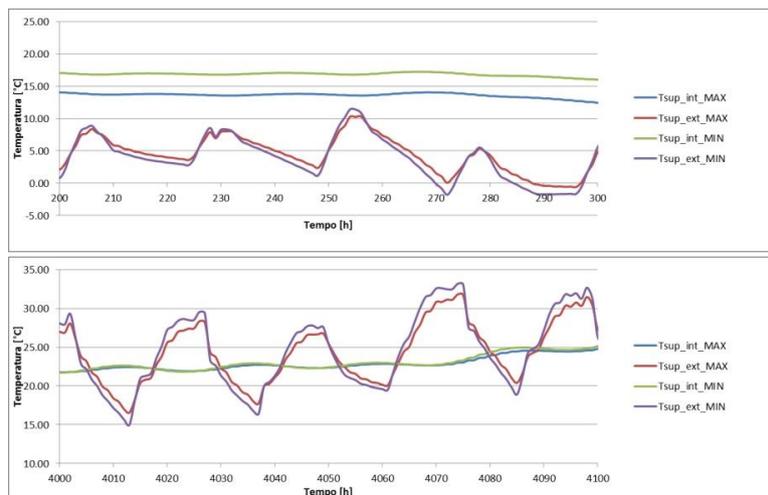


Figura 45. Differenza tra le temperature superficiali dei pacchetti murari delle Tabelle 17 e 18 (periodo invernale ed estivo indicato sulla base di 8760 ore annue).

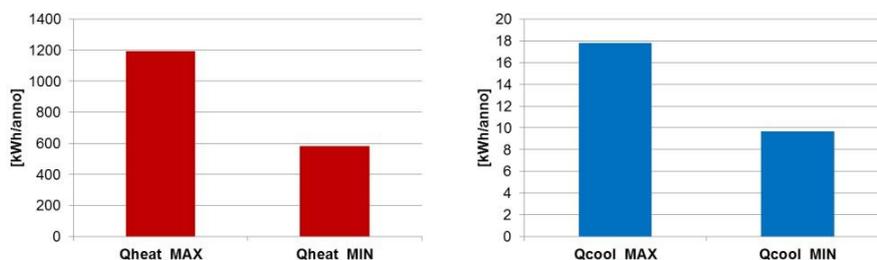


Figura 46. Fabbisogni energetici di riscaldamento e raffrescamento calcolati per il pacchetto murario della Tabella 17.

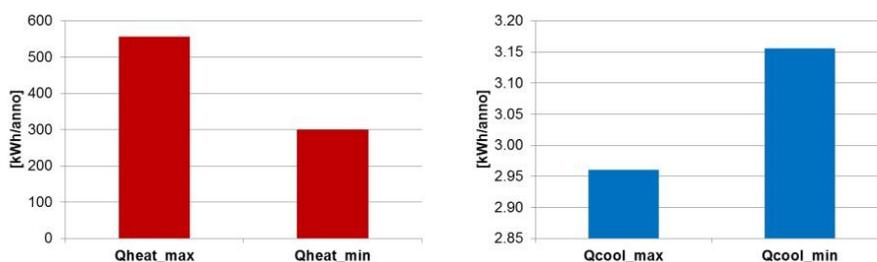


Figura 47. Fabbisogni energetici di riscaldamento e raffrescamento calcolati per il pacchetto murario della Tabella 18.

Eseguita questa prima analisi relativa all'influenza dei parametri termici, è stato simulato il comportamento in regime dinamico di alcuni pacchetti murari, ipotizzando di conoscere con certezza le proprietà termiche di ogni singolo strato. È stata quindi riprodotta una parete caratterizzata da proprietà termiche equivalenti, sottoposta alle medesime variazioni di temperatura esterna. È stato ipotizzato un orientamento Nord e coefficienti di scambio termico convettivo pari a $3.05 \text{ W/m}^2\text{K}$ per il lato interno e $17.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ per il lato esterno (valori suggeriti dallo stesso software di simulazione). I pacchetti murari esaminati sono caratterizzati da un'alternanza di materiali differenti, contraddistinti da proprietà termiche dissimili. Le stratigrafie simulate vengono riportate nella Figura 48, nella quale è possibile leggere le informazioni relative ad ogni singolo strato della parete.

I risultati relativi alle simulazioni compiute per i pacchetti murari rappresentati nella Figura 48 vengono di seguito mostrati.

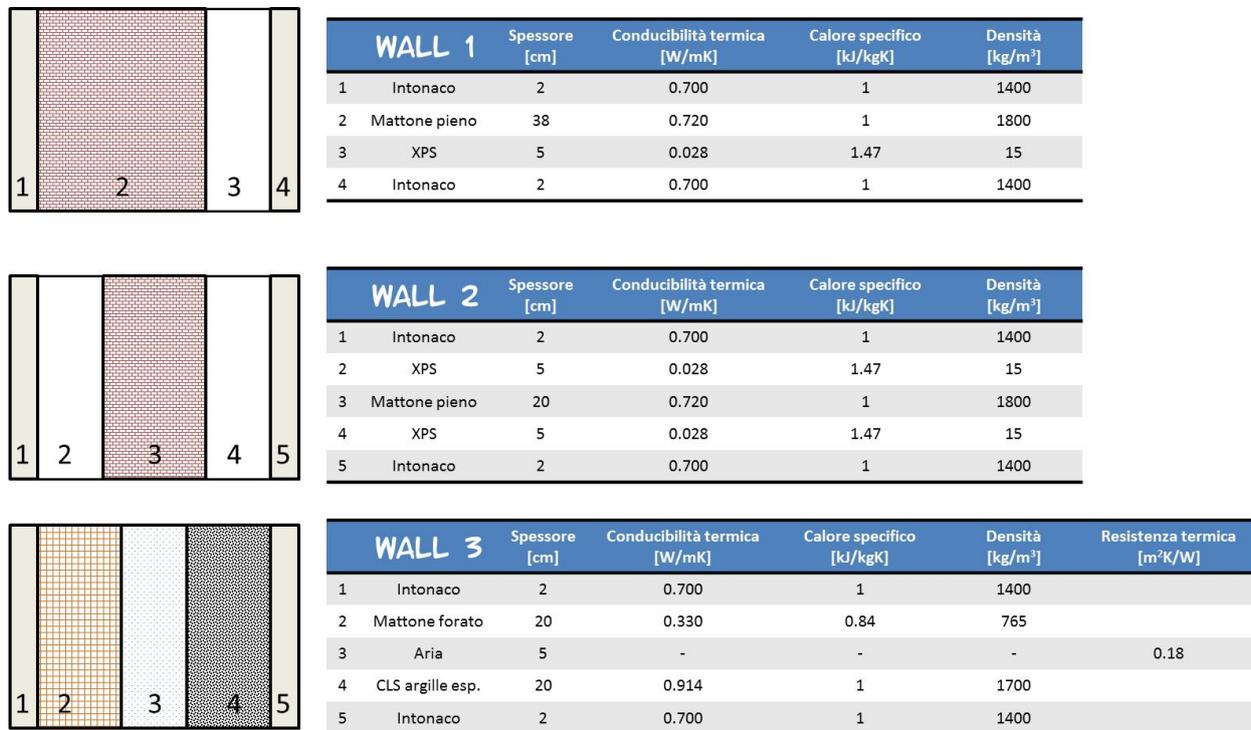


Figura 48. Pacchetti murari simulati.

WALL 1 - La parete presenta uno spessore complessivo pari a 47 cm ed è costituita da uno strato di 38 cm di mattoni pieni ed uno strato isolante di 5 cm in XPS. Inoltre la parete è intonacata da ambo i lati. Attraverso il software di simulazione dinamica è stato riprodotto il pacchetto murario e successivamente, mantenendo inalterate le condizioni al contorno, è stata creata una parete dello stesso spessore ma costituita da un singolo materiale caratterizzato da proprietà termiche equivalenti. La creazione del modello prevede la scelta e l'interconnessione di specifiche *Types* presenti nel software TRNSYS, come mostrato dalla Figura 49.

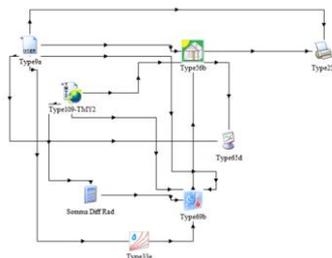


Figura 49. Connessioni tra *Types* all'interno del software TRNSYS.

La Figura 50 mostra invece i risultati ottenuti in termini di sovrapposizione tra le temperature superficiali della parete di partenza e della parete equivalente. Inoltre, la stessa figura mostra un grafico a barre relativo alle differenze di temperatura calcolate tra la parete di partenza e quella equivalente. È possibile osservare come sul lato interno tali differenze siano inferiori a 0.3°C e come, sul lato esterno, il valore massimo sia inferiore a 0.7°C.

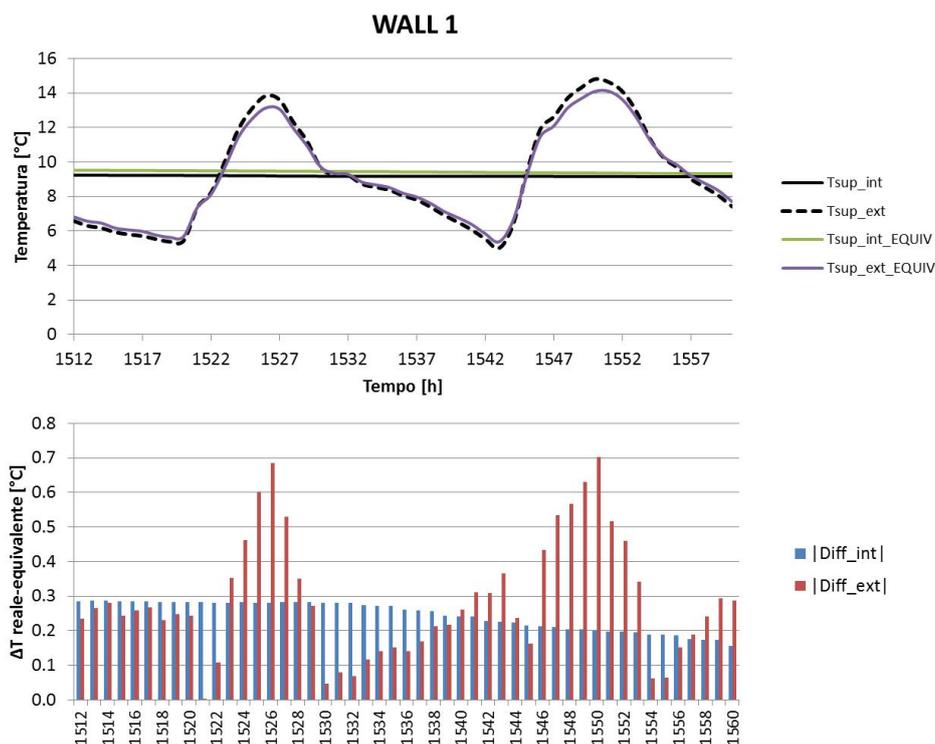


Figura 50. Temperature superficiali e differenze di temperatura tra la parete di partenza ed il modello equivalente (Wall 1).

WALL 2 - La parete presenta uno spessore complessivo di 34 cm ed è costituita da un doppio strato di materiale isolante (XPS) posto a cavallo di uno strato di 20 cm di mattoni pieni. La parete è inoltre intonacata da ambo i lati. Attraverso il software di simulazione dinamica è stato riprodotto il pacchetto murario e successivamente, mantenendo inalterate le condizioni al contorno, è stata creata una parete dello stesso spessore ma costituita da un singolo materiale caratterizzato da proprietà termiche equivalenti. La Figura 51 mostra i risultati ottenuti in termini di sovrapposizione tra le temperature superficiali della parete di partenza e della parete equivalente. Inoltre, la stessa figura mostra un grafico a barre relativo alle differenze di temperatura calcolate tra la parete di partenza e quella equivalente. È possibile osservare come sul lato interno tali differenze siano al massimo pari a 0.1°C e come, sul lato esterno, il valore massimo sia inferiore a 0.3°C.

WALL 3 - La parete presenta uno spessore complessivo di 49 cm ed è costituita da mattoni forati, un'intercapedine d'aria e calcestruzzo di argille espanse. La parete è inoltre intonacata da entrambe i lati. Attraverso il software di simulazione dinamica è stato riprodotto il pacchetto murario e successivamente, mantenendo inalterate le condizioni al contorno, è stata creata una parete dello stesso spessore ma costituita da un singolo materiale caratterizzato da proprietà termiche equivalenti. La Figura 52 mostra i risultati ottenuti in termini di sovrapposizione tra le temperature superficiali della parete di partenza e della parete equivalente. Inoltre, la stessa figura mostra un grafico a barre relativo alle differenze di temperatura calcolate tra la parete di partenza e quella equivalente. È possibile osservare come sul lato interno tali differenze siano inferiori a 0.4°C e come, sul lato esterno, il valore massimo sia inferiore quasi sempre a 0.5°C.

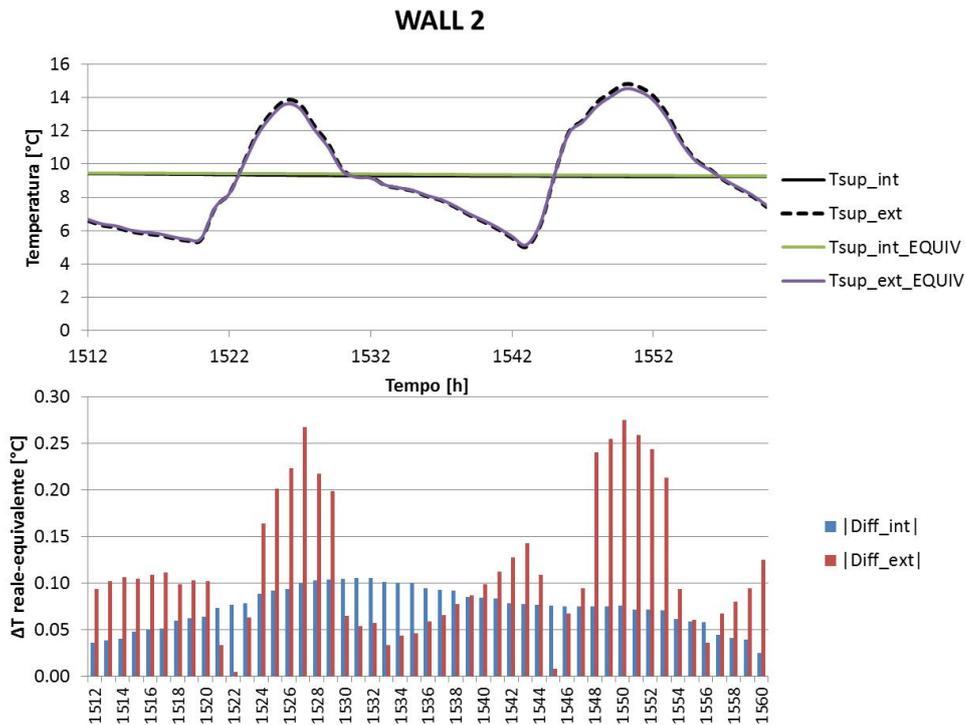


Figura 51. Temperature superficiali e differenze di temperatura tra la parete di partenza ed il modello equivalente (Wall 2).

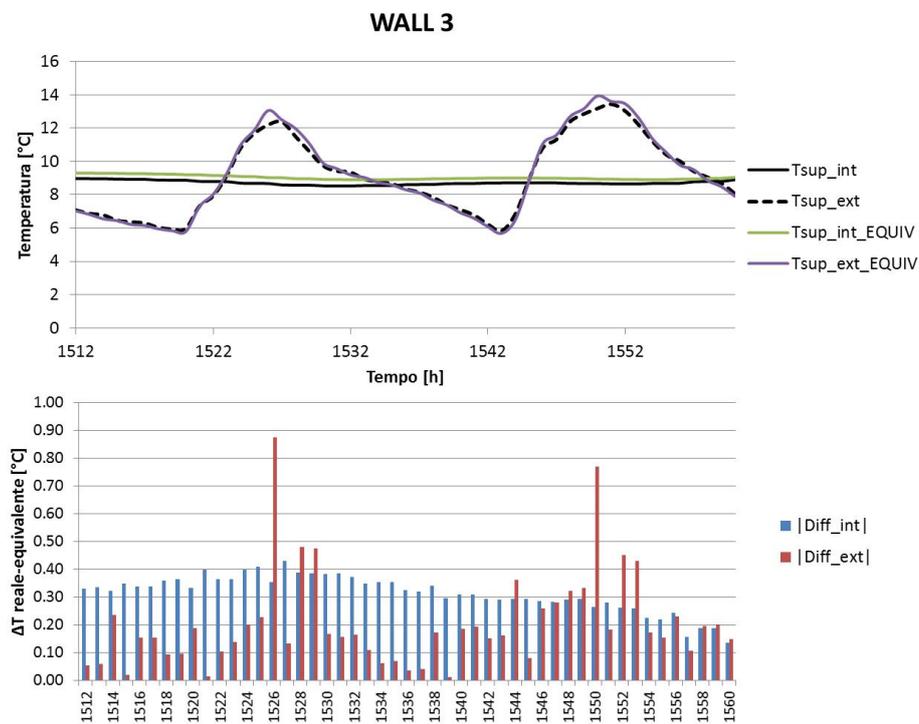


Figura 52. Temperature superficiali e differenze di temperatura tra la parete di partenza ed il modello equivalente (Wall 3).

Le proprietà termiche equivalenti per i tre casi appena analizzati sono riportate nella Tabella 19.

Tabella 19. Proprietà termiche equivalenti.

	Conducibilità termica equivalente [W/mK]	Calore specifico equivalente [kJ/kgK]	Densità equivalente [kg/m ³]
WALL 1 EQUIV.	0.197	1.15	1490
WALL 2 EQUIV.	0.086	1.50	1000
WALL 3 EQUIV.	0.414	0.70	1770

Occorre ora capire se la riproduzione degli andamenti delle temperature superficiali per un arco temporale di sole 48 ore è sufficiente a riprodurre in modo fedele i fabbisogni energetici. Per questo motivo, considerando una parete disperdente di 20 m² esposta a Nord, sono stati simulati i fabbisogni annuali di riscaldamento e raffrescamento considerando i tre pacchetti *Wall 1*, *Wall 2* e *Wall 3* e le tre murature equivalenti. Il confronto tra i fabbisogni energetici ottenuti dai pacchetti murari originali e quelli equivalenti è riportato nella Tabella 20.

Tabella 20. Confronto tra pareti originali ed equivalenti.

	Q _{heat} [kWh]	Q _{cool} [kWh]		Q _{heat} [kWh]	Q _{cool} [kWh]		Q _{heat} [kWh]	Q _{cool} [kWh]
WALL 1	338	0	WALL 2	217.56	0.86	WALL 3	661.64	9.90
WALL 1 EQUIV.	337.92	1.64	WALL 2 EQUIV.	215.92	0.86	WALL 3 EQUIV.	661.85	8.00

Eseguita questa preliminare analisi sulla capacità di riprodurre i comportamenti dei pacchetti murari attraverso un materiale *generico* caratterizzato da proprietà termiche equivalenti, le pareti reali indagate nell'arco dei tre anni della formazione dottorale (sulle quali sono state condotte analisi termoflussimetriche e misure della temperatura superficiale) sono state ricostruite tramite il software di simulazione dinamica TRNSYS pensando di simulare il comportamento complessivo di parete, senza avere a disposizione informazioni sulle proprietà termiche dei singoli strati. Le informazioni *certe* sul comportamento delle pareti derivano esclusivamente dall'utilizzo della strumentazione utilizzata. L'obiettivo è quello di riprodurre il comportamento della parete ipotizzando l'esistenza di un unico materiale contraddistinto da *proprietà termiche equivalenti* in grado di riprodurre in modo adeguato il comportamento della parete reale oggetto di analisi.

Questa procedura operativa consente di ottenere un risultato sulla base di alcuni passaggi chiave:

- Svolgimento di una campagna di misura con termoflussimetro e sonde di temperatura superficiale per un intervallo temporale adeguato (la norma indica un tempo minimo di acquisizione di 72 ore che può risultare inadeguato);
- Rielaborazione dei dati acquisiti;
- Creazione di un modello attraverso il simulatore dinamico al quale applicare le condizioni al contorno reali;
- Avvio della prima simulazione con parametri termici di prova;
- Cicli di simulazione per l'individuazione dei parametri termici equivalenti che consentano la migliore riproduzione delle temperature superficiali interne ed esterne.

L'analisi condotta, applicata a stratigrafie differenti, consente di individuare un modo di operare (o meglio un modo di schematizzare la parete), quando le proprietà termiche non sono note.

La rielaborazione dei dati acquisiti consiste nella creazione di un set di dati in formato tale da poter essere utilizzato all'interno del software TRNSYS: in particolare si tratta della creazione di file contenenti i profili di temperatura che si sono manifestati a cavallo della parete durante la campagna di misura. In questo modo è possibile ricreare all'interno del software di simulazione condizioni al contorno reali.

La creazione del modello prevede la scelta e l'interconnessione di specifiche *Types* presenti nel software TRNSYS, come mostrato precedentemente dalla Figura 49.

Il modello geometrico consiste nell'esclusiva realizzazione di una parete costituita da un materiale creato dall'utente e caratterizzato da proprietà equivalenti che inizialmente non potranno essere rappresentative del comportamento reale della parete. Nella prima fase di realizzazione del modello può essere associata alla parete equivalente la sola *conducibilità termica* ($\lambda_{equivalente}$) ricavata attraverso l'analisi termoflussimetrica e l'elaborazione dei dati ottenuti. Per quanto riguarda i valori della densità e del calore specifico possono essere inseriti inizialmente *valori di prova*.

Tali valori consentono un primo avvio della simulazione ma non rappresentano valori necessariamente importanti ai fini dell'individuazione dei parametri termici equivalenti.

Seguono cicli di simulazione per l'individuazione dei parametri termici equivalenti che permettono la migliore riproduzione delle temperature superficiali interne ed esterne.

La valutazione della combinazione dei valori delle proprietà termiche che meglio approssima il comportamento della parete può essere eseguita valutando le differenze tra le temperature superficiali misurate e quelle simulate. In particolare è possibile citare due indici proposti da Greenwood et al. [52] e Loague e Green [53], ovvero l'*efficienza di modellazione* (*EF*) e il *coefficiente di massa residua* (*CRM*). Questi due indici sono calcolati secondo le seguenti formule:

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^N O_i - \sum_{i=1}^N P_i}{\sum_{i=1}^N O_i}$$

dove O_i è il valore *i*-esimo osservato, P_i è il valore *i*-esimo simulato, \bar{O} è il valore medio delle osservazioni. Il valore ottimale per *EF* è 1: valori maggiori di 0 indicano che le stime del modello sono migliori della media delle osservazioni. Il valore ottimale per *CRM* è invece 0: valori positivi informano che il modello tende a sottostimare i dati misurati, mentre valori negativi indicano il contrario.

In questo modo, essendo nota la termofisica dell'edificio, non esiste più la necessità di affidarsi alle consuete metodologie di calibrazione basate sulla necessità di acquisire dati riguardanti le variazioni nel tempo delle temperature interne. Come già detto, i valori di temperatura dell'aria misurati attraverso sonde poste all'interno degli ambienti devono essere confrontati con i valori simulati dal software: qualora la simulazione non dovesse fornire profili di temperatura accettabili (quindi comparabili con il comportamento reale dell'edificio) è necessario un intervento di correzione da parte dell'utente. In altre parole, la fase di calibrazione prevede una serie di piccole operazioni (quindi rifiniture o modifiche) che portano progressivamente ad un modello calibrato.

Occorre sottolineare che nei casi relativi ai tre pacchetti murari precedentemente analizzati (chiamati *Wall 1*, *Wall 2* e *Wall 3*) sono stati imposti specifici valori per i coefficienti di scambio termico convettivo. Occorre quindi comprendere quale sia l'influenza di tali coefficienti sulle capacità di

riproduzione del comportamento di una parete. Se da un lato è possibile forzare il modello fornendo come input direttamente una temperatura superficiale (quella del lato interno o quella del lato esterno), dall'altro sarà necessario impostare un valore plausibile per il coefficiente di scambio termico convettivo. La norma UNI EN ISO 6946 suggerisce un coefficiente convettivo esterno calcolato sulla base di una velocità del vento pari a 4 m/s, che assume l'espressione $h_{conv} = 4 + 4v$, dove v è proprio la velocità del vento. Applicando tale relazione è possibile ottenere un valore pari a 20 W/m²K. Risulta evidente però che la velocità del vento non è costante nel tempo. Ipotizzando in prima approssimazione di voler mantenere costante il valore dei coefficienti di scambio termico convettivo, è stato simulato il comportamento del pacchetto *Wall 1* (Figura 48) considerando tre condizioni differenti: coefficiente convettivo interno per tutte le condizioni pari a 3.05 W/m²K e coefficiente convettivo esterno pari a 27 W/m²K, 17.8 W/m²K (valore consigliato dal software) e 7 W/m²K. L'influenza del valore associato al coefficiente convettivo sulle temperature superficiali è mostrato nella Figura 53, nella quale è possibile osservare un abbassamento delle temperature all'aumentare del valore del coefficiente di scambio termico convettivo. Le maggiori variazioni riscontrate per l'intervallo temporale analizzato raggiungono il valore massimo di circa 2°C. La figura riporta inoltre l'andamento nel tempo dell'irraggiamento solare per l'intervallo di tempo considerato.

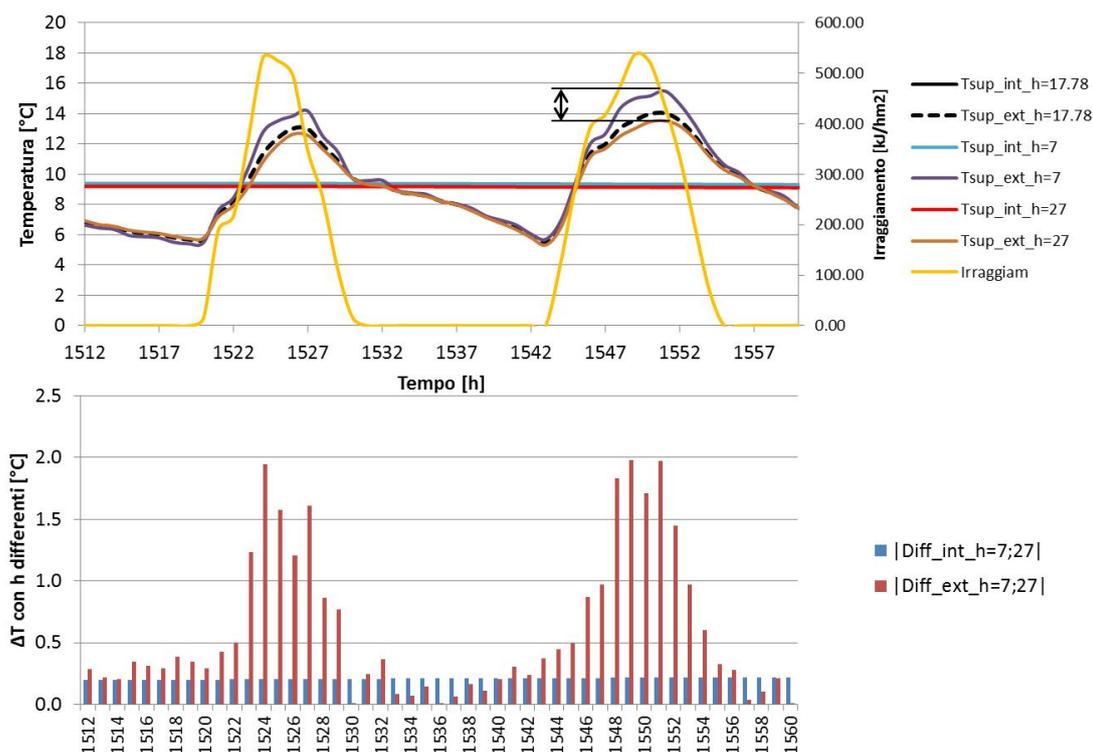


Figura 53. Influenza del coefficiente di scambio termico convettivo.

A valle dei risultati mostrati nella Figura 53 è necessario controllare l'entità dell'errore che è possibile introdurre quando non si hanno dati certi sulle velocità del vento in prossimità della parete analizzata. L'utilizzo di una stazione meteo ogniqualvolta si intenda analizzare una parete non può essere una soluzione praticabile, sia per ragioni economiche sia per ragioni connesse all'esistenza di idonei spazi di installazione per la strumentazione. Tuttavia, in ogni città sono presenti stazioni meteorologiche fisse i cui dati sono facilmente reperibili ed accessibili. In particolare, le stazioni meteo offrono la possibilità di visualizzare i valori medi giornalieri della velocità del vento. Per questo motivo è stata

fatta un'analisi sull'incidenza dei valori associati ai coefficienti di scambio termico convettivo esterni, basati sull'acquisizione di dati provenienti da stazioni meteo poste a distanze differenti.

Ipotizzando di analizzare un pacchetto murario di un edificio posto in prossimità dell'Università degli Studi Roma TRE, sarebbe possibile acquisire dati dalla stazione meteo di Ciampino, dalla stazione meteo di Fiumicino, dalla stazione meteo dell'Aeroporto Roma-Urbe o da una stazione meteo posta nel quartiere EUR. Inoltre il software TRNSYS dispone di weather-data per la città di Roma, contenenti valori orari della velocità del vento. La Figura 54 mostra la posizione geografica delle differenti stazioni meteo citate precedentemente. La Figura 55 mostra un confronto tra i coefficienti convettivi ricavati applicando la relazione $h_{conv} = 4 + 4v$, nella quale la velocità del vento è quella misurata dalle diverse stazioni meteo di Roma, dal 1 dicembre 2014 sino al 6 dicembre 2014, con i relativi valori medi (mostrati dall'istogramma a destra). Nel grafico è presente un valore costante ($h_{trnsys_default}$): tale valore è quello automaticamente impostato dal software quando l'utente non è in grado di fornire uno specifico valore o una specifica correlazione per il coefficiente di scambio termico convettivo. È possibile poi osservare h_{trnsys} , ricavato direttamente dal weather-data del software che fornisce valori orari della velocità del vento, e $h_{ISO\ 6946}$, ricavato direttamente dalla normativa che calcola il coefficiente convettivo sulla base di una velocità del vento costante pari a 4 m/s. È stato scelto l'intervallo di tempo che va dal 1 al 6 dicembre 2014 poiché tale intervallo coincide con quello di alcune misure eseguite in un caso di studio.

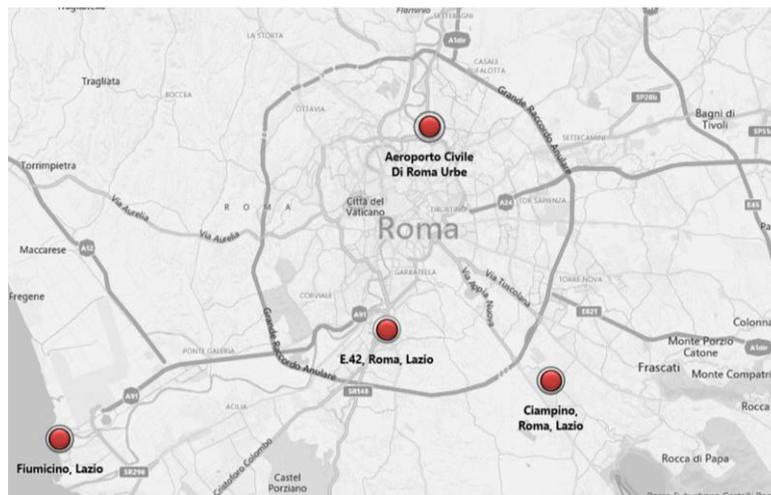


Figura 54. Posizione geografica di alcune stazioni meteo riferite alla città di Roma.

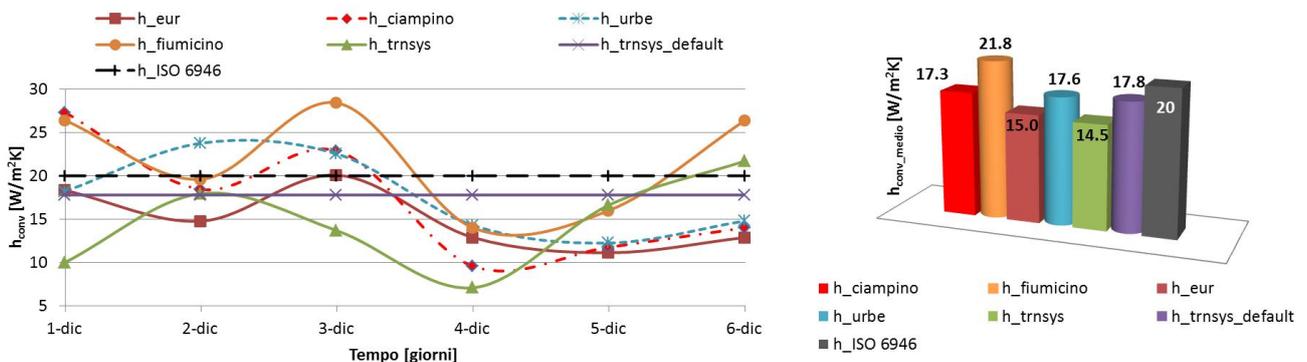


Figura 55. Coefficienti di scambio termico convettivi ricavati attraverso le velocità del vento misurate da alcune stazioni meteo di Roma.

Confrontando il valore del coefficiente di scambio termico convettivo suggerito dalla norma e i valori ricavati dai rilievi effettuati dalle stazioni meteo del territorio romano, è possibile osservare come il valore costante offerto dalla normativa si collochi per il 60% del tempo di osservazione in posizione centrale rispetto ai valori ricavati dalle misurazioni e per il 40% (5 e 6 dicembre 2014) risulti maggiore.

La Tabella 21 mostra gli scarti percentuali tra il coefficiente di scambio convettivo indicato dalla normativa e i valori medi ricavati utilizzando le velocità del vento rilevate dalle stazioni meteorologiche.

Tabella 21. Scarti percentuali tra il coefficiente di scambio convettivo indicato dalla normativa e i valori medi ricavati utilizzando le velocità del vento rilevate dalle stazioni meteorologiche.

	h_ciampino	h_fiumicino	h_urbe	h_eur	h_trnsys	h_trnsys_default
Scarto Percentuale	-13.4%	+9%	-11.8%	-25%	-27.5%	-11.1%

La Figura 56 mostra l'influenza dei coefficienti convettivi esterni sui profili di temperatura quando vengono impostati nel simulatore i valori medi "minimo" (14.5 W/m²K) e "massimo" (21.8 W/m²K) registrati nell'intervallo temporale dal 1 al 6 dicembre 2014.

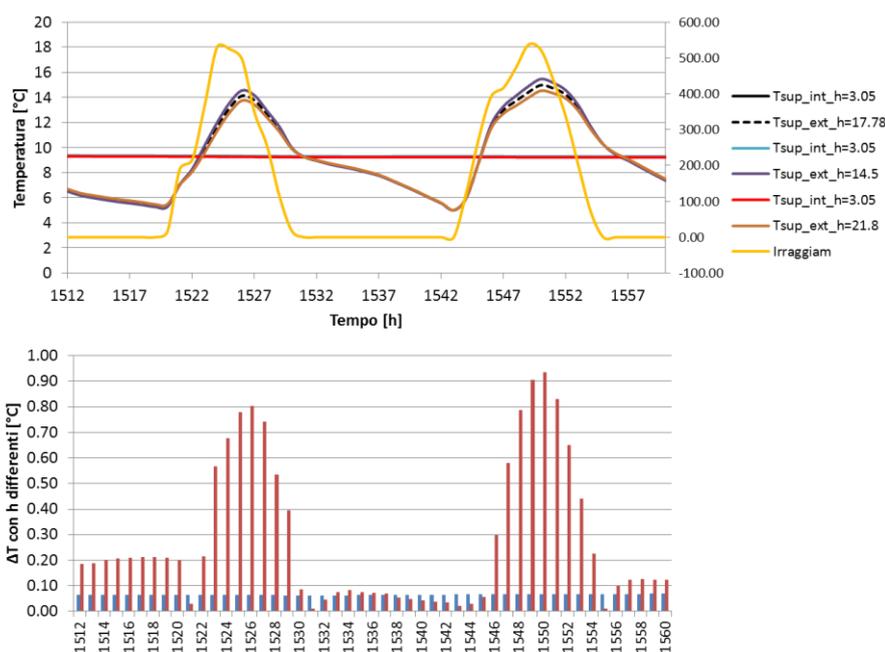


Figura 56. Influenza del coefficiente di scambio termico convettivo considerando i valori minimo e massimo riportati nell'istogramma della figura 53.

La Tabella 22 riassume i casi di studio esaminati, per i quali sono stati realizzati i modelli di simulazione per l'individuazione dei parametri termici equivalenti. Sono state indagate stratigrafie più antiche e più recenti per comprendere meglio la risposta effettiva della metodologia proposta. La Figura 57 esprime schematicamente l'applicazione degli strumenti di misura e la creazione del modello equivalente di parete. Per ogni caso studio sono stati individuati i parametri termici equivalenti e sono stati calcolati i valori delle *efficienze di modellazione* (indici *EF*) sia per il lato interno che per il lato esterno, fornendo così un'indicazione sulla capacità del modello di riprodurre il comportamento reale del pacchetto murario. Le Figure 58, 59 e 60 mostrano gli andamenti nel tempo delle temperature superficiali interne misurate e simulate. Vale la pena di precisare che

all'interno dei modelli di simulazione si è scelto di utilizzare per il coefficiente convettivo esterno il valore suggerito dalla normativa.

Tabella 22. Casi di studio esaminati per i quali sono stati realizzati modelli di simulazione per l'individuazione dei parametri termici equivalenti

	Descrizione sintetica	Trasmittanza termica misurata [W/m²K]
Edificio A	Edificio risalente agli anni '50 sito a Roma la cui stratigrafia (presunta) è composta da mattoni forati e calcestruzzo	1.044
Edificio B	Edificio risalente agli anni 2000 la cui stratigrafia è composta da mattoni forati intonacati	0.669
Edificio C	Edificio risalente agli anni '60 sito a Roma di cui non si conosce la stratigrafia interna	1.369

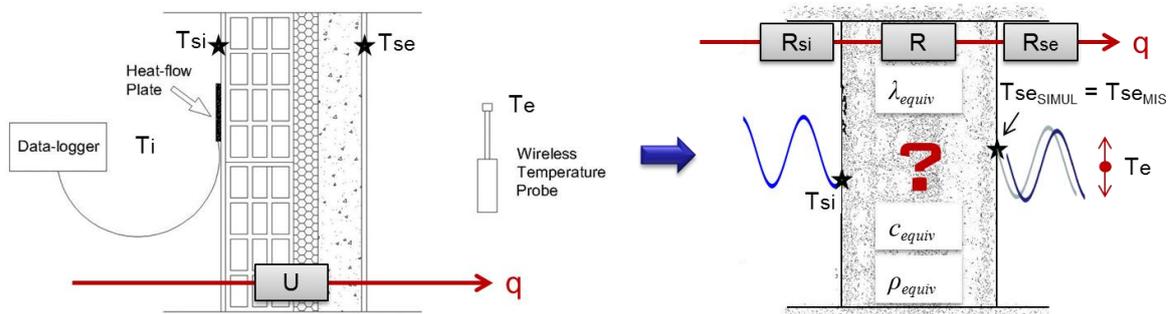


Figura 57. Applicazione degli strumenti e schema equivalente di parete.

Nelle figure le *temperature superficiali misurate* vengono sempre rappresentate con linee tratteggiate, mentre le *temperature superficiali simulate* vengono raffigurate da curve colorate. Le figure mostrano inoltre nella parte bassa i valori assoluti delle differenze tra le temperature misurate e quelle simulate. La Tabella 23 riporta i valori dei parametri termici equivalenti dei pacchetti murari e i valori delle efficienze di modellazione (*EF*) calcolate per il lato interno e per il lato esterno.

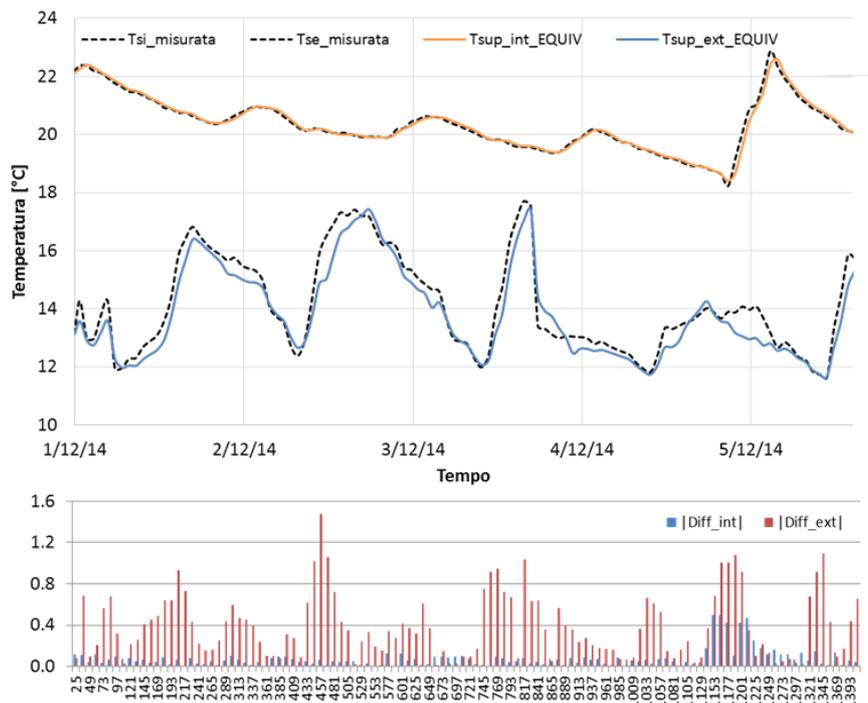


Figura 58. Modello equivalente della parete dell'Edificio A.

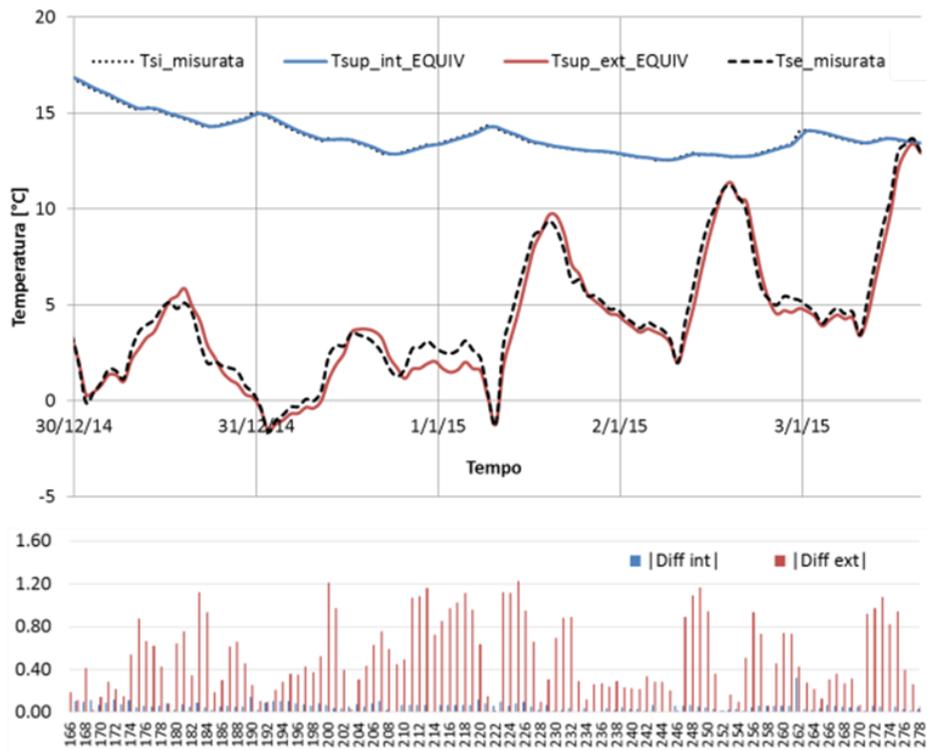


Figura 59. Modello equivalente della parete dell'Edificio B.

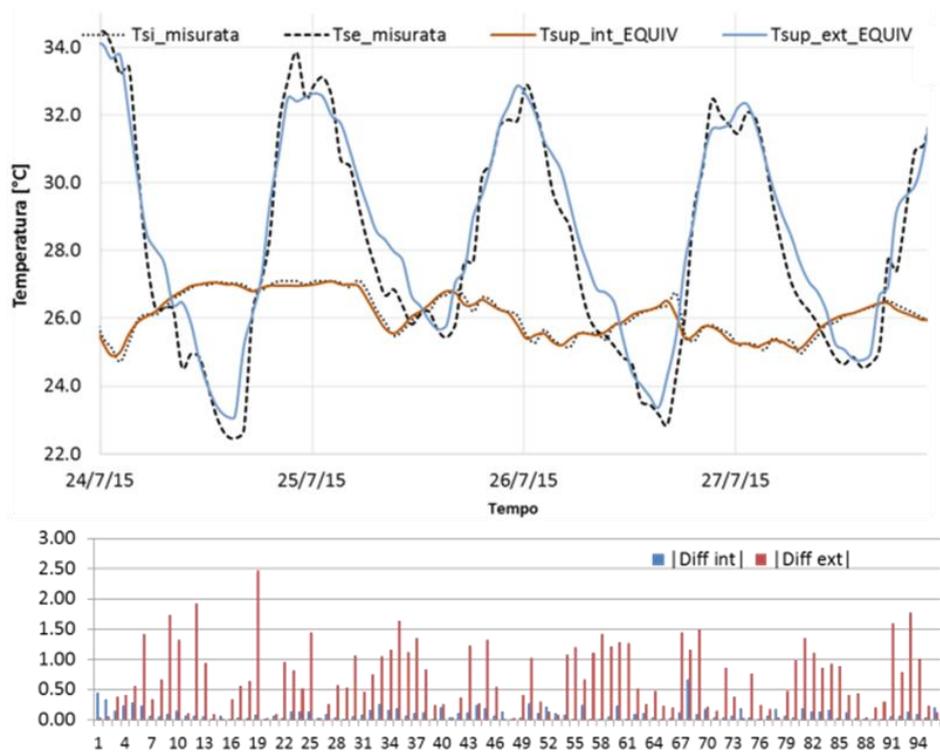


Figura 60. Modello equivalente della parete dell'Edificio C.

Tabella 23. Parametri termici equivalenti ed efficienze di modellazione dei casi studio analizzati.

	Trasmittanza termica misurata [W/m ² K]	Spessore parete [m]	λ_{equiv} [W/mK]	C_{equiv} [kJ/kgK]	ρ_{equiv} [kg/m ³]	EF T sup interna	EF T sup esterna
Edificio A	1.044	0.51	0.668	0.4	340	0.95	0.86
Edificio B	0.669	0.32	0.241	0.7	800	0.95	0.94
Edificio C	1.369	0.60	1.070	0.6	1400	0.95	0.90

Dai risultati ottenuti per i casi studio analizzati è possibile osservare una non eccezionale capacità dei modelli di seguire le temperature superficiali misurate ma è necessario ricordare che sono stati utilizzati un coefficiente convettivo costante e una modellazione degli scambi termici radiativi attraverso il weather-data del software. Una più accurata valutazione degli scambi termici adduttivi esterni può essere condotta attraverso l'impiego della piastra termoflussimetrica. Analogamente a quanto viene fatto per l'interno, sulla parte esterna della parete è possibile misurare il flusso termico uscente applicando un termoflussimetro. Si è già detto che tale strumento viene comunemente utilizzato sul lato interno per valutare la potenza termica scambiata attraverso la parete (la misura di tale potenza consente di ricavare poi la trasmittanza termica dell'elemento murario) e non è, ad oggi, costruito in modo opportuno per resistere agli agenti atmosferici esterni. L'indice di protezione dello strumento presente nel laboratorio di fisica tecnica è *IP 54*: ciò significa che lo strumento è protetto contro la polvere e gli spruzzi d'acqua. Per tale ragione è stato individuato un edificio in grado di offrire un'adeguata protezione per lo strumento: si è deciso di installare lo strumento su una parete protetta, all'esterno, da una particolare struttura in grado di non far bagnare lo strumento durante una probabile pioggia invernale ma che, al tempo stesso, consentisse un'adeguata circolazione d'aria. La Figura 29 mostra la struttura esterna di copertura e l'applicazione degli strumenti. La trasmittanza misurata dal lato esterno presenta un valore pari a 0.910 W/m²K, comparabile con il valore 0.810 W/m²K misurato sul lato interno della parete (lo scarto percentuale tra i due valori è circa pari al 12%). Le indagini strumentali consentono di ricavare il valore dei coefficienti di adduzione nel tempo. Le Figure 61, 62 e 63 mostrano i risultati ottenuti e l'elaborazione dei dati attraverso il metodo delle medie progressive. La Figura 64 mostra un valore stabilizzato pari a circa 10 W/m²K, valore distante dai 25 W/m²K indicati dalla normativa.



Figura 61. Applicazione del termoflussimetro e della sonda di temperatura superficiale all'esterno.

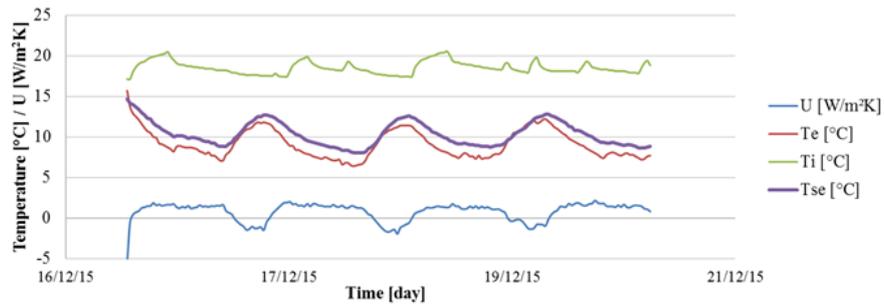


Figura 62. Trasmittanza e temperature ottenuti dai rilievi strumentali eseguiti sul lato interno.



Figura 63. Trasmittanza termica stabilizzata con il metodo delle medie progressive, misurata dal lato esterno.

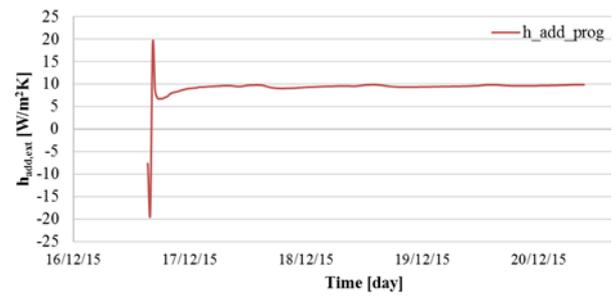


Figura 64. Coefficiente di scambio termico adduttivo esterno ottenuto dalla rielaborazione delle misure.

5. Apporti innovativi

L'innovazione introdotta attraverso le attività di ricerca affrontate riguarda la possibilità di indagare la problematica oggi esistente relativa ad una corretta definizione del comportamento termico dinamico di una parete (la cui stratigrafia, nella maggior parte dei casi, risulta sconosciuta) attraverso la definizione di proprietà termiche *equivalenti*. La definizione del comportamento termico passa attraverso la conoscenza delle proprietà termiche dei singoli strati che compongono le pareti ma tale conoscenza risulta (nella maggior parte dei casi) negata sia dalla mancanza di documentazione tecnica attendibile, sia dall'impossibilità di eseguire prove distruttive. Tali prove compromettono lo stato della struttura e risultano certamente più dispendiose sia da un punto di vista economico che di tempo. Oggi, il concetto di efficienza energetica è essenzialmente legato al panorama edilizio esistente (attraverso il concetto di riqualificazione) dove è necessario intervenire in base ad una comprensione del comportamento dell'edificio. Data l'assenza, nella quasi totalità dei casi, di documentazione tecnica attendibile e l'impossibilità di intervento con tecniche diagnostiche distruttive, il metodo proposto in questo progetto di ricerca si collocherebbe all'interno della categoria delle *indagini diagnostiche non distruttive*, utili per la definizione delle proprietà termiche equivalenti dei pacchetti murari. L'analisi dei risultati ottenuti sia sul lato interno che sul lato esterno della parete, ha suggerito la possibilità di proporre un nuovo approccio metodologico per la determinazione delle condizioni al contorno delle stratigrafie oggetto di indagine. Tale metodo consiste nell'utilizzo di due piastre termoflussimetriche simultaneamente applicate alla parete, una sul lato interno ed una sul lato esterno (Figura 65). Devono essere inoltre applicate sonde di temperatura superficiale su ambo i lati. Il confronto tra un sistema convenzionale wireless ed un sistema implementato viene mostrato nella Figura 66.

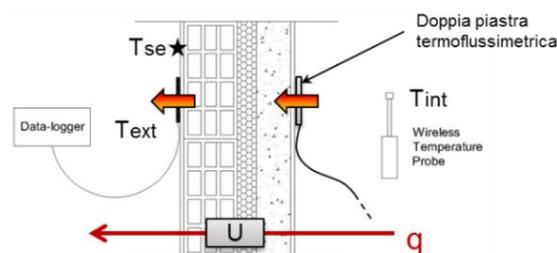


Figura 65. Impiego simultaneo di due piastre termoflussimetriche.

Attraverso l'utilizzo simultaneo di due piastre, di sensori di temperatura superficiale e sensori di temperatura dell'aria interna ed esterna è possibile monitorare il comportamento della parete in termini di flussi termici dispersi. Inoltre, è possibile ricavare i coefficienti di scambio termico adduttivo sia per il lato interno che per il lato esterno. In questo modo è possibile abbandonare la semplificazione legata ai coefficienti di scambio termico convettivo esterni definiti in funzione delle velocità del vento. Inoltre, la possibilità di stimare i coefficienti di scambio termico adduttivo esterni consente, a sua volta, di abbandonare l'utilizzo del software TRNSYS, dando vita alla possibilità di creare un software specifico e di più immediato utilizzo per l'utente, che sia in grado di eseguire

autonomamente l'elaborazione dei dati misurati. Ad esempio, la metodologia proposta potrebbe essere assistita da un solutore di equazioni (ad esempio *MatLab*).

Vale la pena di precisare che l'attività di ricerca svolta all'interno della formazione dottorale ha consentito di raggiungere una proposta iniziale la cui concretizzazione necessiterà studi più approfonditi e prove sperimentali. I risultati mostrati all'interno di questa tesi pongono quindi le basi per sviluppi ulteriori che saranno necessari per ottenere la validazione del metodo proposto.

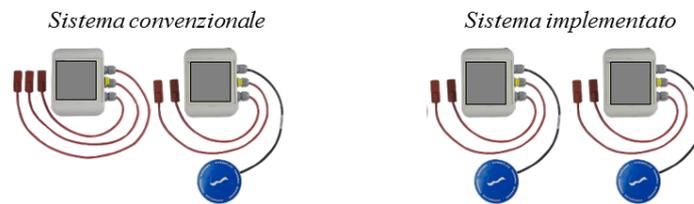


Figura 66. Strumento implementato dotato di doppia piastra termoflussimetrica.

6. Conclusioni

La possibilità di simulare il comportamento energetico degli edifici attraverso l'impiego di codici di calcolo dinamici rappresenta oggi un passo sostanziale per tenere adeguatamente in considerazione gli effetti inerziali prodotti dagli accumuli termici delle masse murarie. Tale aspetto, riveste un ruolo particolarmente importante in paesi come l'Italia, dove gran parte del panorama edilizio esistente risale a periodi storici in cui le tecniche costruttive prevedevano l'impiego di calcestruzzo o mattoni ricavati direttamente dai materiali locali. Nonostante ciò, vale la pena di precisare che l'utilizzo di un codice dinamico che non sia supportato da un'adeguata conoscenza delle stratigrafie dei pacchetti murari può condurre a risultati poco attendibili. Oggi, il concetto di efficienza energetica è fondamentalmente congiunto al panorama edilizio esistente (tramite l'idea di riqualificazione) dove è necessario intervenire in base ad una comprensione del comportamento dell'edificio. Data l'assenza, nella quasi totalità dei casi, di documentazione tecnica attendibile e l'impossibilità di intervento con tecniche diagnostiche distruttive, il metodo proposto in questo progetto di ricerca si collocherebbe all'interno della categoria delle *indagini diagnostiche non distruttive*, utili per la definizione delle proprietà termiche equivalenti dei pacchetti murari.

Il metodo proposto porta con sé effetti pratici riguardanti la possibilità di individuare proprietà termiche fondamentali per quantificare il comportamento energetico degli edifici: si abbandonerebbe il concetto di trasmittanza termica stazionaria basata sulla sola conducibilità termica, lasciando il posto al concetto di diffusione del calore, che vede al suo interno la coesistenza di conducibilità termica, densità e calore specifico.

Conseguentemente, il metodo consente di migliorare l'accoppiamento edificio-impianto: tale concetto deriva da una più precisa stima delle prestazioni energetiche, con conseguenze dirette in termini di dimensionamento impiantistico, tenendo in conto fenomeni di accumulo termico.

Inoltre, il metodo proposto è un metodo non distruttivo: l'applicazione della strumentazione non prevede alcuna alterazione della parete, conservando in questo modo la totale funzionalità del pacchetto murario, con conseguenti vantaggi in termini di tempo e denaro.

Al tempo stesso il metodo consente di risparmiare tempo per la calibrazione del modello: la fase di calibrazione necessita di misure *in situ* su base semestrale o annuale. Risulta facilmente comprensibile come l'installazione di sensori di temperatura per intervalli temporali così lunghi mal si sposa con le esigenze occupazionali degli edifici (fatta eccezione per specifici e rari casi).

È quindi possibile concludere che l'obiettivo che si è cercato di perseguire consiste nella definizione di un nuovo metodo diagnostico strumentale non distruttivo, caratterizzato essenzialmente da *semplicità di utilizzo e fruibilità da parte di tutti*, contraddistinto da molteplici implicazioni di natura pratica, con ripercussioni di natura economica ed ambientale.

Quanto svolto all'interno della formazione dottorale ha permesso di raggiungere una proposta iniziale, ponendo così le basi per sviluppi ulteriori che saranno necessari per ottenere la validazione del metodo proposto.

Riferimenti Bibliografici

- [1] R.H. Henninger, M.J. Witte. Energy Plus Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE Standard, 140-2004 (prepared for: U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy Office of Building Technologies Washington, D.C.), 2007.
- [2] D. B. Crawley, J. W. Hand, M. Kummert, B. T. Griffith. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment* 43, 2008, 661–673.
- [3] F.J. Rey, E. Velasco, F. Varela. Building Energy Analysis (BEA): a methodology to assess building energy labelling. *Energy and Buildings* 39, 2007, 709–716.
- [4] S. Ferrari. Building Envelope and Heat Capacity: Re-discovering the Thermal Mass for Winter Energy Saving. 2nd PALENC & 28th AIVC Conferences, 2007, Crete Island, Greece.
- [5] S. Ferrari, M. Baldinazzo. Valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici: dalle norme semplificate all'analisi dinamica, Atti Convegno AICARR, Certificazione energetica: normative e modelli di calcolo per il sistema edificio-impianto posti a confronto. Bologna 16/10-Torino 25/11/2008, Napoli 16/01/2009.
- [6] N. Aste, A. Angelotti, M. Buzzetti. The Influence of the External Walls Thermal Inertia On the Energy Performance of Well Insulated Buildings. *Energy and Buildings* 41, 2009, 1181–1187.
- [7] UNI TS 11300 - Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale. Ente Nazionale Italiano di Unificazione.
- [8] M. L. Sweet, J. T. McLeskey Jr. Numerical Simulation of Underground Seasonal Solar Thermal Energy Storage (SSTES) for a Single Family Dwelling Using TRNSYS. *Solar Energy* 86, 2012, 289-300.
- [9] C. J. Banister, W. R. Wagar, M. R. Collins, Validation of a Single Tank, Multi-Mode Solar-Assisted Heat Pump TRNSYS Model. *Energy Procedia* 48, 2014, 499-504.
- [10] R. Chargui, H. Sammouda. Modeling of a Residential House Coupled with a Dual Source Heat Pump Using TRNSYS Software. *Energy Conversion and Management* 81, 2014, 384–399.
- [11] L.T. Terziotti, M.L. Sweet, J.T. McLeskey Jr. Modeling Seasonal Solar Thermal Energy Storage in a Large Urban Residential Building Using TRNSYS 16. *Energy and Buildings* 45, 2012, 28–31.
- [12] TRNSYS, Transient System Simulation Tool, <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>.
- [13] G.P. Mitalas. Transfer Function Method of Calculating Cooling Loads, Heat Extraction and Space Temperature. *ASHRAE J.* 14, 1973, 54–56.
- [14] Design Builder, <http://www.designbuilder.co.uk>.
- [15] Autodesk Ecotect Analysis, <http://www.autodesk.it/adsk/servlet/pc/index?id=15078641&siteID=457036>.
- [16] Eurostat, 2009, Energy, transport and environment indicators, European Commission, Luxemburg.
- [17] G. Fasano. L'efficienza Energetica Nel Settore Civile, Laboratorio Tecnografico ENEA, 2011.
- [18] CRESME, Il Mercato Delle Costruzioni 2011-2015. Rapporto congiunturale e previsionale, 2011.
- [19] V. Corrado, I. Ballarini, S.P. Corgnati, N. Talà. Building Typology Brochure – Italy.
- [20] UNI 10351 - Materiali da Costruzione. Conduttività Termica e Permeabilità al Vapore. Ente Nazionale Italiano di Unificazione.
- [21] UNI 10355 - Murature e Solai - Valori della Resistenza Termica e Metodi di Calcolo. Ente Nazionale Italiano di Unificazione.
- [22] UNI EN ISO 6946 - Componenti ed Elementi per Edilizia, Resistenza Termica e Trasmittanza Termica. Ente Nazionale Italiano di Unificazione.
- [23] Atlante Italiano della Radiazione Solare, ENEA. <http://www.solaritaly.enea.it>.

- [24] International Performance Measurement and Verification Protocol, <http://www.ipmvp.org>.
- [25] US Department of Energy, Measurement and Verification Guidelines.
- [26] ASHRAE Guideline 14-2002: Measurement of Energy and Demand Savings. Atlanta, GA 30329: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2002.
- [27] UNI CEI TR 11428 - Gestione dell'energia - Diagnosi energetiche - Requisiti generali del servizio di diagnosi energetica. Ente Nazionale Italiano di Unificazione.
- [28] P. Baggio, R. Perneti, A. Prada. Simulazione Energetica degli Edifici Esistenti – Guida alla Definizione di Modelli Calibrati. EPC Editore.
- [29] ISO 9869 - Thermal Insulation - Building Elements - In-situ Measurement of Thermal Resistance and Thermal Transmittance. International Organization for Standardization.
- [30] L.F. Cabeza, A. Castell, M. Medrano, I. Martorell, G. Pérez, I. Fernández. Experimental Study on the Performance of Insulation Materials in Mediterranean Construction. *Energy and Buildings* 42, 2010, 630–636.
- [31] R.R. Zarr. A History of Testing Heat Insulators at The National Institute of Standards and Technology, *ASHRAE Transactions*, 2001, 107, 661–671.
- [32] G. Desogus, S. Mura, R. Ricciu. Comparing different Approaches to In-situ Measurement of Building Components Thermal Resistance. *Energy and Buildings* 43, 2011, 2613–2620.
- [33] F. Asdrubali, F. D'Alessandro, G. Baldinelli, F. Bianchi. Evaluating In-situ Thermal Transmittance of Green Buildings Masonries - A case study. *Case Studies in Construction Materials* 1, 2014, 53-59.
- [34] L. Peeters, I. Beausoleil-Morrison, A. Novoselac. Internal Convective Heat Transfer Modeling: Critical Review and Discussion of Experimentally Derived Correlations. *Energy and Buildings* 43, 2011, 2227-2239.
- [35] S. Churchill, H. Chu. Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 18, 1975, 1323–1329.
- [36] S. Churchill, R. Usagi. A General Expression for the Correlation of Rates of Transfer and Other Phenomena. *AIChE Journal* 18, 1972, 1121–1128.
- [37] F. Alamdari, G. Hammond. Improved Data Correlations for Buoyancy-Driven Convection in Rooms. *Building Services Engineering research and Technology* 4, 1983, 106–111.
- [38] S. Fohanno, G. Polidori. Modelling of Natural Convective Heat Transfer at an Internal Surface. *Energy and Buildings* 38, 2006, 548–553.
- [39] T. Min, L. Schutrum, G. Parmelee, J. Vourist. Natural Convection and Radiation in a Panel-heated Room. *Heating, Piping and Air Conditioning*, 1956, 153–160.
- [40] H. Awbi, A. Hatton. Natural Convection from Heated Room Surfaces. *Energy and Buildings* 30, 1999, 233–244.
- [41] A. Khalifa, R. Marshall. Validation of Heat Transfer Coefficients on Interior Building Surfaces Using Real-Sized Indoor Test Cell, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 33, 1990, 2219–2236.
- [42] W.H. McAdams, *Heat Transmission*, McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo, Japan, 1954.
- [43] W. Jürges, Der wärmeübergang an einer ebenen wand (heat transfer at a plane wall), *Gesundheits-Ingenieur (Beiheft Nr. 19)*, 1924.
- [44] E.M. Sparrow, J.W. Ramsey, E.A. Mass, Effect of Finite Width on Heat Transfer and Fluid Flow about an Inclined Rectangular Plate. *Journal of Heat Transfer* 101, 1979, 204.
- [45] Energy Plus, *Energy Plus Engineering Reference, The Reference to Energy Plus Calculations*, 2007.
- [46] T. Kusuda. NBSLD, the Computer Program for Heating and Cooling Loads in Buildings. NBS Building Science Series 69, National Bureau of Standards, Washington, DC, 1976.

- [47] S.E.G. Jayamaha, N.E. Wijesundera, S.K. Chou. Measurement of the Heat Transfer Coefficient for Walls. *Building and Environment* 31, 1996, 399-407.
- [48] S. Sharples. Full-scale Measurements of Convective Energy Losses from Exterior Building Surfaces. *Building and Environment* 19, 1984, 31-39.
- [49] K. Nicol. The Energy Balance of an Exterior Window Surface, Inuvik, N.W.T., Canada. *Building and Environment* 12, 1977, 215-219.
- [50] D.L. Loveday, A.H. Taki. Convective Heat Transfer Coefficients at a Plane Surface on a Full-Scale Building Façade. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 39, 1996, 1729-1742.
- [51] M. Mirsadeghi, D. Cóstola, B. Blocken, J.L.M. Hensen. Review of External Convective Heat Transfer Coefficient Models in Building Energy Simulation Programs: Implementation and Uncertainty. *Applied Thermal Engineering* 56, 2013, 134-151.
- [52] D.J. Greenwood, J.J. Neeteson, A. Draycott. Response of Potatoes to N Fertilizer: Dynamic Model. *Plant Soil* 85, 1985, 185-203.
- [53] K. Loague, R.E. Green. Statistical and Graphical Methods for Evaluating Solute Transport Models: Overview and Application. *J. Contam. Hydrol.* 7, 1991, 51-73.
- [54] C. Clauser, E. Huenges. *Rock Physics & Phase Relations: A Handbook of Physical Constants*; Ahrens, T.J., Ed.; AGU Reference Shelf Series; American Geophysical Union: Washington, DC, USA, 1995; Vol. 3, 105–126.

Publicazioni ottenute durante la formazione dottorale

- I. Energy Performance Optimization of a Bus for Urban Public Transport – R. De Lieto, F. Botta, **L. Evangelisti**, P. Gori, C. Guattari – *International Journal of Engeneering and Technology (IJET)* – Vol 5 No 4 Aug-Sep 2013
- II. An Integrated Approach for an Historical Buildings Energy Analysis in a Smart Cities Perspective – R. De Lieto, **L. Evangelisti**, E. Carnielo, G. Battista, P. Gori, C. Guattari, A. Fanchiotti – *Energy Procedia*, 45 (2014) 372 – 378
- III. A New Method of Technical Analysis to Optimise the Design of Low Impact Energy Systems for Buildings - R. De Lieto Vollaro, M. Calvesi, G. Battista, **L. Evangelisti**, P. Gori, C. Guattari - *IJETI (International Journal of Engineering and Technology Innovation)*, vol. 3, no. 4, 2013, pp. 241-250
- IV. Calculation Model for Optimization Design of Low Impact Energy Systems for Buildings – R. De Lieto, M. Calvesi, G. Battista, **L. Evangelisti**, F. Botta – *Energy Procedia* 48 (2014) 1459 – 1467
- V. Robustness of Acoustic Scattering Cancellation to Parameter Variations - C. Guattari, P. Gori, R. de Lieto Vollaro, **L. Evangelisti**, G. Battista, C. Basilicata, A. Toscano, F. Bilotti - *Sustainability* 6 (7), 4416 - 4425
- VI. Bus for urban public transport: energy performance optimization – R. De Lieto, **L. Evangelisti**, G. Battista, P. Gori, C. Guattari, A. Fanchiotti – *Energy Procedia* 45 (2014) 731 – 738
- VII. Influence of the Thermal Inertia in the European Simplified Procedures for the Assessment of Buildings' Energy Performance - **L. Evangelisti**, G. Battista, C. Guattari, C. Basilicata, R. de Lieto Vollaro - *Sustainability* 6 (7), 4514 - 4524
- VIII. Buildings Energy Efficiency: Interventions Analysis Under a Smart Cities Approach - G. Battista, **L. Evangelisti**, C. Guattari, C. Basilicata, R. De Lieto Vollaro - *Sustainability* 6 (8), 4694 - 4705
- IX. Analysis of Two Models for Evaluating the Energy Performance of Different Buildings - **L. Evangelisti**, G. Battista, C. Guattari, C. Basilicata, R. De Lieto Vollaro - *Sustainability* 6 (8), 5311 – 5321
- X. Building Energy Performance Analysis: A Case Study – R. De Lieto Vollaro, C. Guattari, **L. Evangelisti**, G. Battista, E. Carnielo, P. Gori – *Energy and Buildings* 87, 87–94, 2015
- XI. Influence of Shading and Transparent Surfaces on Historical Building Energy Retrofit – **L. Evangelisti**, C. Guattari, G. Battista, L. Santarpia - *Applied Mechanics and Materials* 737, 173-177
- XII. Energy System Feasibility of a High Efficient Building – G. Battista, **L. Evangelisti**, C. Guattari, A. Fanchiotti, L. Santarpia - *Applied Mechanics and Materials* 737, 159-163
- XIII. Predictive Models for Evaluating Mobility Buses Thermal Performance – **L. Evangelisti**, G. Battista, C. Guattari, R. De Lieto Vollaro, L. Santarpia - *Applied Mechanics and Materials* 737, 313-317
- XIV. Energy Retrofit of Historical Buildings Based on Windowed Elements – C. Guattari, G. Battista, **L. Evangelisti**, A. Fanchiotti, L. Santarpia - *Applied Mechanics and Materials* 737, 154-158
- XV. Energy Performance and Thermal Comfort of a High Efficiency House: RhOME for denCity, Winner of Solar Decathlon Europe 2014 – G. Battista, E. Carnielo, **L. Evangelisti**, M. Frascarolo, R. de Lieto Vollaro - *Sustainability* 2015, 7(7), 9681-9695
- XVI. Energy Retrofit Strategies for Residential Building Envelope: An Italian Case Study of an early-50s Building - **L. Evangelisti**, C. Guattari, P. Gori – *Sustainability* 2015, 7(8), 10445-10460
- XVII. In-Situ Thermal Transmittance Measurements for Investigating Differences Between Wall Models and Actual Building Performance - **L. Evangelisti**, C. Guattari, P. Gori, R. De Lieto Vollaro - *Sustainability* 2015, 7(8), 10388-10398
- XVIII. Accuracy of Lumped-Parameter Representations for Heat Conduction Modeling in Multilayer Slabs - P. Gori, C. Guattari, R. De Lieto Vollaro, **L. Evangelisti** - *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)* 655 (2015) 012065