Politecnico di Torino
Dipartimento Energia

Dottorato di Ricerca in *Innovazione Tecnologica per l'Ambiente Costruito*
XXIV Ciclo

TESI DI DOTTORATO

# SVILUPPO E VALIDAZIONE DI MODELLI DI CALCOLO DELLA PRESTAZIONE ENERGETICA DELL'EDIFICIO: PONTI TERMICI E COMPONENTI SPECIALI DI INVOLUCRO

Candidata

Alice Gorrino

Tutor

prof. Vincenzo Corrado

**Allegato A al Verbale della riunione del Collegio Docenti del 20/12/2011**

**DOTTORATO DI RICERCA IN INNOVAZIONE TECNOLOGICA PER L'AMBIENTE COSTRUITO**
**XXIV CICLO – triennio 2009 – 2011**

**Sede amministrativa: Politecnico di Torino**
**Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica**

**PRESENTAZIONE AL COLLEGIO DOCENTI DELLA DISSERTAZIONE FINALE**

**Dottorando: Alice Gorrino**

**Titolo della tesi:**
**Sviluppo e validazione di modelli di calcolo della prestazione energetica dell'edificio: ponti termici e componenti speciali di involucro.**

**Obiettivi generali e particolari.**
Nell'ambito della valutazione del fabbisogno di energia degli edifici, la tesi approfondisce le metodologie per l'analisi dei ponti termici e dei componenti speciali di involucro (serre solari e coperture verdi). Con l'entrata in vigore della Direttiva europea 2010/31/EU (EPBD *recast*) si promuovono infatti interventi volti alla costruzione di edifici ad altissima prestazione energetica e si affida al CEN il compito di elaborare norme europee relative ai metodi di calcolo. Allo stato attuale mancano, o necessitano di implementazione, adeguate metodologie di calcolo armonizzate che permettano di tenere in adeguata considerazione gli scambi termici in prossimità dei nodi strutturali (ponti termici), gli apporti solari entranti in ambiente climatizzato attraverso serre solari e gli scambi termici attraverso le coperture verdi.
La ricerca si propone, relativamente a ciascun ambito di indagine, di confrontare metodologie di calcolo semplificate e metodologie di calcolo dettagliate (attraverso l'utilizzo di strumenti che operano alle differenze finite, in regime dinamico ecc.) al fine di implementare le metodologie di calcolo semplificate.

**Contenuti.**
Prima di affrontare gli argomenti specifici dell'analisi, sono state analizzate in generale tre metodologie per il calcolo del fabbisogno di energia termica dell'edificio: mensile quasi stazionaria e oraria semplificata (secondo UNI EN ISO 13790) e dinamica (implementato in *EnergyPlus*). Il confronto, applicato ad una palazzina residenziale, è stato effettuato in coerenza con una serie di opzioni definite per la congruenza dei modelli.

Per quanto concerne l'analisi dei ponti termici, il lavoro ha previsto la determinazione della trasmittanza termica lineare $\psi$ attraverso calcoli alle differenze finite secondo la norma UNI EN ISO 10211, al variare dei parametri progettuali significativi; il confronto tra tali valori di $\psi$ calcolati e i corrispondenti valori standard secondo la norma UNI EN ISO 14683; la creazione di un atlante di ponti termici; l'individuazione di equazioni di correlazione e applicazione dell'analisi di sensibilità al fine di quantificare il peso che la variazione dei parametri di ingresso ha sulla variazione di $\psi$; l'analisi dell'incidenza dei ponti termici sulle dispersioni termiche totali per trasmissione e sul fabbisogno di energia termica dell'edificio per alcuni casi di studio.

Per quanto concerne il calcolo degli apporti solari entranti in ambiente climatizzato attraverso le serre solari, il lavoro ha previsto il confronto tra il metodo semplificato della norma UNI EN ISO 13790 e il metodo dettagliato implementato in *EnergyPlus*. Alcune analisi parametriche al variare delle caratteristiche fisico-tecniche e morfologiche della serra sono state condotte su un modello di serra solare addossata ad un locale climatizzato al fine di confrontare gli apporti solari calcolati con i due metodi. Allo scopo di analizzare lo scostamento tra i metodi in termini di fabbisogno di energia termica nel periodo invernale, è stato analizzato un edificio residenziale con una serra solare addossata.

Per quanto concerne il calcolo della trasmissione di calore attraverso le coperture verdi, il lavoro ha previsto l'analisi di una metodologia di calcolo adeguata a tenere in considerazione i fenomeni fisici propri della tecnologia e, a partire da tale modello, l'individuazione e il calcolo di un parametro termo-fisico rappresentativo della copertura verde. In particolare, a partire dalla metodologia implementata in *EnergyPlus*, è stata calcolata la trasmittanza termica periodica equivalente ($Y_{ie}$) per coperture verdi. Un'analisi di sensibilità è stata condotta e un confronto tra i valori di $Y_{ie}$ calcolati attraverso il metodo di calcolo individuato e i valori di $Y_{ie}$ calcolati attraverso il metodo semplificato è stato effettuato.

**Risultati raggiunti.**
I risultati maggiormente rilevanti ottenuti durante il triennio sono relativi ai confronti tra metodologie di calcolo. In particolare, dal confronto in termini di fabbisogno di energia termica attraverso i metodi della UNI EN ISO 13790 e simulazione dinamica (*EnergyPlus*) emerge una sostanziale differenza tra il metodo di calcolo mensile e il metodo dinamico durante la stagione estiva, mentre i metodi divergono moderatamente (2% ÷ 15%) in stagione di riscaldamento.
Per quanto concerne i metodi per la caratterizzazione energetica dei ponti termici, delle coperture verdi e delle serre solari, emerge una sostanziale inadeguatezza dei metodi di calcolo proposti dalla normativa tecnica e quindi la necessità di un utilizzo di metodologie maggiormente dettagliate al fine di meglio valutare i benefici indotti dall'utilizzo di tali tecnologie.

**Giudizio sulla dissertazione.**
Nello svolgimento della tesi la dottoranda ha dimostrato una piena padronanza, sia a livello metodologico sia applicativo, dei modelli matematici e dei codici di calcolo nel campo della prestazione energetica dell'edificio, nonché della sintesi dei risultati. Il lavoro è stato condotto secondo un approccio razionale e sistematico, sia nell'analisi delle fonti bibliografiche e normative, sia nello studio, nello sviluppo e nell'applicazione dei modelli di calcolo, sia nel confronto analitico e critico dei risultati, nello sviluppo di correlazioni tra dati e nell'effettuazione di analisi di sensibilità. La metodologia di indagine risulta adeguata e rivela capacità critiche anche nei confronti del proprio lavoro.
La ricerca presenta caratteri di originalità, soprattutto legati alla proposte di soluzioni d'involucro innovative, all'analisi critica autonoma dei risultati ottenuti, allo sviluppo della normativa tecnica, a nuove proposte per la caratterizzazione termo-energetica di componenti innovativi dell'involucro edilizio.

| | |
|---|---|
| Il Tutor | Il Coordinatore |
| (prof. V. Corrado) | (prof. M. Filippi) |
| …….. | …… |

# Indice

Introduzione…… 7

1. Modelli complessi e modelli semplificati……12

1.1 Classificazione dei modelli di calcolo della prestazione energetica degli edifici……. 12

1.2 I modelli di calcolo analizzati…….. 14

1.2.1 Il metodo mensile quasi stazionario…….. 14

1.2.2 Il metodo orario semplificato…… 17

1.2.3 Il modello di calcolo implementato all'interno di *EnergyPlus*…… 23

1.3 Confronto tra i modelli e opzioni per la congruenza……. 27

1.4 Analisi di un caso di studio……44

2. Analisi dei ponti termici…….. 56

2.1 Il fenomeno fisico e la definizione delle tipologie di ponte termico…… 56

2.2 Analisi dei modelli di calcolo semplificato…….. 60

2.2.1 La legislazione nazionale vigente…… 60

2.2.2 La normativa tecnica di settore – UNI EN ISO 14683……. 62

2.2.3 Gli atlanti di ponti termici……. 63

2.3 Studio teorico per la caratterizzazione analitica……... 66

2.3.1 La normativa tecnica di settore – UNI EN ISO 10211……. 66

2.3.2 Gli studi a livello nazionale e internazionale…… 71

2.4 Analisi parametrica……... 74

2.5 Creazione di un atlante di ponti termici…… 85

2.6 Individuazione di equazioni di regressione e analisi di sensibilità…….. 91

2.7 Analisi dell'incidenza dei ponti termici sul fabbisogno energetico dell'edificio…….101

3. Componenti di involucro speciali: le serre solari…….. 134

3.1 Il fenomeno fisico e la definizione delle tipologie di serre solari…… 134

3.2 Incentivi all'utilizzo di serre solari: la legislazione vigente…… 139

3.3 Analisi dei modelli di calcolo semplificato…… 142

3.3.1 La normativa tecnica di settore – UNI EN ISO 13790…… 142

3.3.2 Gli studi di ricerca a livello nazionale e internazionale…….. 150

3.4 Analisi dei modelli di calcolo dettagliato……... 154

3.4.1 Gli studi di ricerca a livello nazionale e internazionale…….. 154

3.4.2 Modello di calcolo del software *EnergyPlus*…….. 155

3.5 Analisi parametrica……. 157

3.6 Analisi dell'incidenza delle serre solari sul fabbisogno energetico dell'edificio….. 168

4. Componenti di involucro speciali: i tetti verdi…….. 175

4.1 Il fenomeno fisico e la definizione delle tipologie di tetti verdi…….. 175

4.2 Incentivi all'utilizzo di coperture verdi: la legislazione vigente……. 180

4.3 Analisi dei modelli di calcolo semplificati……... 181

4.3.1 La normativa tecnica di settore – UNI EN ISO 13786…… 181

4.4 Analisi dei modelli di calcolo dettagliati…….. 182

4.4.1 Gli studi di ricerca a livello nazionale e internazionale……... 182

4.4.2 Modello di calcolo implementato dal software *EnergyPlus*…….. 184

4.5 Metodo per il calcolo di una trasmittanza termica periodica equivalente della copertura verde…… 194

4.5.1 Metodologia di indagine……. 194

4.5.2 Parametri di ingresso…….. 199

4.5.3 Descrizione del caso di studio……. 207

4.5.4 Analisi parametriche…… 209

4.6 Confronto tra metodi di calcolo…… 221

5. Conclusioni e sviluppi futuri……. 226

Bibliografia…… 232

Nomenclatura…… 241

# Introduzione

Con l'entrata in vigore della Direttiva europea 2002/91/CE (EPBD) e la successiva emanazione della Direttiva europea 2010/31/UE (EBPD *recast*) si pone l'attenzione verso la promozione di interventi sul patrimonio edilizio volti alla costruzione di edifici a energia quasi zero (NZEB), ovvero edifici ad altissima prestazione energetica.

Al fine di conseguire gli obiettivi della nuova direttiva europea, si richiede al progettista di adottare soluzioni tecnologiche volte a ridurre il fabbisogno energetico degli edifici sia in periodo invernale sia in periodo estivo, per ridurre il consumo di energia da fonti non rinnovabili e le emissioni di gas a effetto serra nel settore delle costruzioni.

Si chiede pertanto al progettista di prestare attenzione in primo luogo alla progettazione del fabbricato, attraverso l'impiego di *elementi passivi di riscaldamento e raffrescamento, sistemi di ombreggiamento, […], un'adeguata illuminazione naturale e caratteristiche architettoniche dell'edificio* nonché soprattutto di misure *efficaci sotto il profilo dei costi*.

È chiaro che in quest'ottica il progettista potrà, da un lato, avvalersi di tecnologie "innovative" per l'involucro (opaco e trasparente), le cui prestazioni permettano di ridurre il fabbisogno di energia termica sia durante l'inverno che l'estate; dall'altro lato porre maggiore attenzione ai dettagli costruttivi, con particolare riferimento alle parti dell'involucro più critiche dal punto di vista delle dispersioni di energia termica (ponti termici).

Nel prossimo futuro l'involucro degli edifici sarà caratterizzato da un'elevata resistenza termica, con le conseguenti problematiche accennate relative alle dispersioni attraverso i nodi strutturali, e dall'utilizzo di tecnologie "speciali" che ottimizzino lo sfruttamento degli apporti gratuiti, in modo tale da ridurre i consumi sia in periodo invernale sia in periodo estivo e migliorare le condizioni di comfort termico e visivo e di qualità dell'aria.

Al fine di raggiungere gli obiettivi della Direttiva europea, oltre ad avvalersi di un'attenta progettazione, occorre avere a supporto metodologie di calcolo abbastanza complesse per poter correttamente quantificare i benefici indotti dalla progettazione stessa.

Allo stato attuale, al fine di calcolare il comportamento energetico di un edificio, ci si avvale di diverse metodologie di calcolo che si distinguono in funzione del livello di complessità:

- le metodologie di calcolo complesse permettono di valutare la molteplicità dei fenomeni fisici ma possono essere di difficile utilizzo specializzato anche per la difficoltà di definire la grande quantità di dati di ingresso.
- le metodologie di calcolo semplificate, in genere specificate nella normativa tecnica nazionale ed internazionale, sono generalmente più semplici da utilizzare e sviluppate all'interno di codici di

calcolo di più largo consumo ma, proprio in virtù delle semplificazioni adottate possono a volte comportare una valutazione non rigorosa delle tecnologie adottate.

Al fine di calcolare la prestazione energetica degli edifici con metodi di calcolo armonizzati a livello europeo, la Commissione Europea ha trasmesso al CEN il compito di sviluppare norme europee nel settore della prestazione energetica degli edifici.
In particolare, la Commissione Europea, attraverso il mandato M/343, demandava al CEN il compito di elaborare norme europee relative ai metodi di calcolo nel quadro della Direttiva 2002/91/CE.
Il nuovo mandato trasmesso al CEN nel quadro della Direttiva 2010/31/UE, M/480, costituisce il seguito del precedente mandato.
Secondo quanto specificato dalla nuova Direttiva, alle norme tecniche è demandato il compito di elaborare un metodo per il calcolo del fabbisogno di energia termica degli edifici, con particolare attenzione ad aspetti relativi, tra gli altri, sistemi solari passivi, elementi di raffrescamento, ponti termici.

In questo contesto si colloca il lavoro di ricerca descritto nella presente tesi, che indaga, da un lato, le metodologie per il calcolo dettagliato dello scambio termico attraverso i dettagli costruttivi (ponti termici) e, dall'altro, le metodologie per la valutazione della prestazione termica di alcuni componenti speciali di involucro. In particolare vengono indagati i modelli per la caratterizzazione energetica di serre solari e coperture verdi.
Inoltre, considerato il ruolo svolto dalla normativa tecnica nell'elaborazione di metodologie di calcolo condivise, scopo della tesi è l'analisi delle metodologie di calcolo semplificate presenti all'interno della normativa tecnica e l'implementazione delle stesse attraverso metodologie di calcolo complesse al fine di valutare tecnologie di involucro che allo stato attuale non vengono prese in considerazione.

L'importanza di tali elementi di involucro (ponti termici, serre solari e coperture verdi) è esplicitata anche nella legislazione nazionale e regionale in tema di risparmio energetico (figura 1).

In particolare, il D. Lgs. 192/2005 e il D. Lgs. 311/2006 impongono un livello limite di trasmittanza termica media per l'involucro, che tiene anche conto delle dispersioni di calore attraverso i ponti termici.
È noto però che, all'aumentare dei livelli di resistenza termica, nel momento in cui diminuiscono le dispersioni di calore attraverso le pareti piane di involucro, aumenta il peso delle dispersioni termiche bi e tridimensionali attraverso i ponti termici. L'incidenza dei ponti termici sulle dispersioni di edifici "ad energia quasi zero" può quindi assumere pesi molto importanti: un'attenta progettazione dei

singoli dettagli costruttivi diventa allora fondamentale anche nell'ottica di impiegare sistemi e tecnologie ottimali in funzione dei costi.

Per quanto riguarda il comportamento estivo dei componenti di involucro, la legislazione vigente (D.P.R. 59/2009) introduce il requisito di trasmittanza termica periodica (a fianco della massa termica frontale), quale parametro atto a descrivere il comportamento di un componente a smorzare il flusso termico entrante in ambiente interno quando sottoposto a sollecitazione termica dinamica esterna. Al fine di ridurre i picchi del flusso termico entrante nell'ambiente confinato, lo stesso Decreto suggerisce l'utilizzo di tecnologie speciali di involucro quali, ad esempi, le coperture verdi. Tecnologie di involucro utili a stabilire condizioni di comfort termico anche in assenza di impianti di condizionamento diventano sempre più importanti.

Per quanto concerne infine l'utilizzo di tecnologie solari passive, la Legge Regionale n. 13 della Regione Piemonte incentiva l'utilizzo di serre solari quali elementi di involucro atti ad aumentare gli apporti solari passivi e quindi diminuire il fabbisogno di energia in periodo invernale.
In vista di edifici caratterizzati da minime dispersioni termiche per trasmissione, gli apporti solari tenderanno ad assumere un ruolo importante nella diminuzione del fabbisogno.

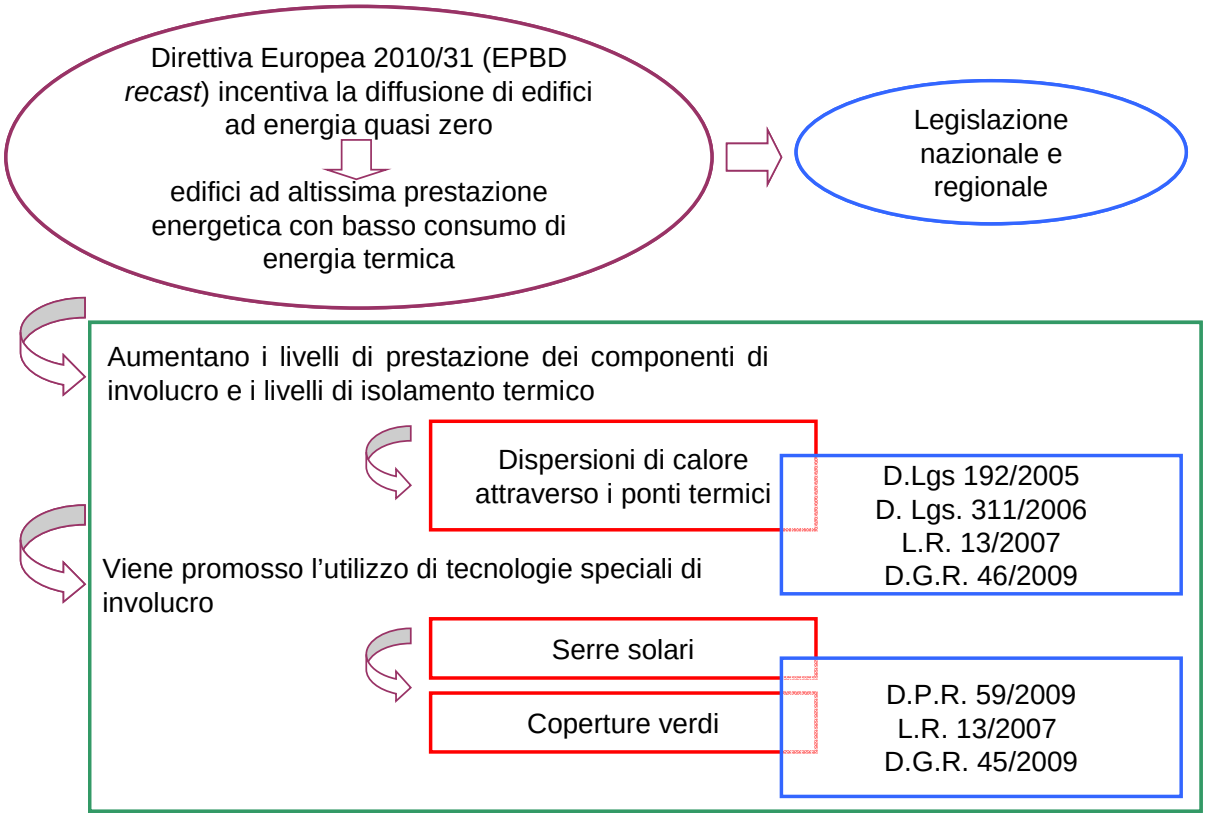



Figura 1. Schema del panorama legislativo nazionale e regionale (Regione Piemonte) in merito alle tecnologie di involucro oggetto di studio a fronte della Direttiva Europea 2010/31/EU.

Nonostante la legislazione incentivi l'utilizzo di tecnologie speciali di involucro e la minimizzazione dei ponti termici, manca al momento una metodologia di calcolo che permetta adeguatamente di quantificare i benefici indotti da una progettazione volta al risparmio energetico.

Allo scopo di indagare le metodologie di calcolo per la caratterizzazione energetica degli oggetti di indagine (ponti termici, serre solari e coperture verdi), sono stati sviluppati confronti tra metodi di calcoli complessi e metodi di calcoli semplificati.

Il presente lavoro si suddivide in quattro capitoli.
Nel primo capitolo viene effettuata un'analisi e un confronto tra metodologie di calcolo della prestazione energetica dell'edificio. Nei capitoli si approfondiscono gli argomenti specifici dell'attività di dottorato: nel capitolo 2 i ponti termici; nel capitolo 3 la serra solare; nel capitolo 4 le coperture verdi.

In particolare nel capitolo 1 vengono descritte tre metodologie per il calcolo del fabbisogno energetico degli edifici:

- mensile quasi stazionario secondo la norma UNI EN ISO 13790;
- orario semplificato secondo la norma UNI EN ISO 13790;
- dinamico implementato all'interno del codice di calcolo *EnergyPlus.*

Questo studio è stato condotto durante un periodo di attività di ricerca svolta all'estero presso la *Istanbul Technical University* ad Istanbul che si è concentrato sul confronto tra la metodologia per il calcolo del fabbisogno di energia termica adottata in Italia (metodo mensile quasi stazionario), la metodologia adottata in Turchia (metodo orario semplificato) e il calcolo dinamico dettagliato.
Al fine di confrontare le tre metodologie, è stato svolto uno studio volto a ricavare le opzioni per la congruenza dei modelli per rendere omogenei i dati di ingresso.
Tale metodologia di indagine è stata applicata ad un caso di studio di cui sono stati ricavati risultati in termini di fabbisogno di energia termica per il riscaldamento e il raffrescamento.

Nel capitolo 2 viene sviluppato il tema inerente l'analisi dei ponti termici. Vengono pertanto analizzati i metodi per il calcolo della trasmittanza termica lineare dei ponti termici: in particolare viene analizzata la norma UNI EN ISO 10211 che fornisce una metodologia dettagliata per il calcolo del flusso termico attraverso i nodi strutturali. Attraverso questa metodologia vengono condotte simulazioni per un gran numero di ponti termici al variare di parametri progettuali significativi al fine della redazione di un atlante di ponti termici che sia di ausilio al progettista e che fornisca valori di trasmittanza termica lineare per ponti termici caratteristici del parco edilizio italiano.
Partendo dai valori ottenuti dalle simulazioni è stata quindi condotta un'analisi di sensibilità attraverso la tecnica ANOVA (ANalysis Of VAriance) che ha reso possibile stabilire quali sono i

parametri di ingresso che influiscono maggiormente sulla variazione della trasmittanza termica lineare.
Infine, attraverso l'applicazione a casi di studio, è stato possibile valutare l'incidenza della variazione della trasmittanza termica lineare dei ponti termici relativi ai casi di studio sulla variazione dello scambio termico per trasmissione attraverso l'involucro e del fabbisogno di energia termica in periodo invernale (calcolato secondo la specifica tecnica UNI/TS 11300-1).
Attraverso il confronto tra la metodologia dettagliata per il calcolo delle trasmittanze termiche lineari (UNI EN ISO 10211) e i valori standard riportati in Appendice A della norma UNI EN ISO 14683 è stato possibile analizzare quanto i ponti termici incidono sul fabbisogno, sia nel caso siano calcolati con metodo dettagliato (UNI EN ISO 10211) sia attraverso metodo semplificato (UNI EN ISO 14683).

Nel capitolo 3 viene svolto uno studio volto alla caratterizzazione energetica delle serre solari. In particolare vengono individuate due metodologie per il calcolo degli apporti solari entranti all'interno dell'ambiente climatizzato attraverso la serra solare: il metodo di calcolo semplificato secondo UNI EN ISO 13790, Appendice E e il metodo di calcolo dettagliato implementato all'interno del codice di simulazione dinamica *EnergyPlus*.
Il confronto tra i due metodi viene condotto per un semplice modulo di serra solare addossato ad un ambiente climatizzato. Viene quindi condotta un'analisi parametrica al variare di alcuni parametri progettuali relativi alla serra solare al fine di analizzare i risultati in termini di apporti solari entranti e confrontare le metodologie di calcolo per diverse configurazioni della serra stessa.
Infine, il confronto è stato esteso ad una palazzina residenziale alla quale è stata addossata una serra solare al fine di confrontare le metodologie di calcolo in termini di fabbisogno di energia termica.

Infine, nel capitolo 4 viene indagato il comportamento energetico delle coperture verdi.
In primo luogo è stato individuato quale modello di calcolo di riferimento, quello implementato all'interno di *EnergyPlus*. Tale modello infatti descrive in maniera adeguata i fenomeni fisici complessi che caratterizzano la copertura verde a livello del manto fogliare e dello strato di coltura.
L'elaborazione dei dati di *output* ha permesso di elaborare un parametro termico (trasmittanza termica periodica equivalente ) che caratterizza il comportamento della copertura verde in presenza di condizioni al contorno di tipo dinamico.
Tale parametro è stato correlato alle diverse proprietà dello strato di vegetazione e del terreno al fine di individuare i parametri progettuali più rilevanti.
Infine, un confronto è stato condotto in termini di trasmittanza termica periodica calcolata attraverso la metodologia dettagliata e la metodologia descritta dalla norma UNI EN ISO 13786.

# 1. Modelli complessi e modelli semplificati

Il lavoro descritto nel presente capitolo è stato svolto durante un periodo di attività presso la *Istanbul Technical University* in Turchia ed è finalizzato al confronto tra i modelli di calcolo del fabbisogno energetico degli edifici in Italia ed in Turchia.

Il metodo di calcolo utilizzato in Italia è riportato nella specifica tecnica UNI/TS 11300-1 e fa riferimento al modello di calcolo mensile quasi stazionario descritto dalla norma europea UNI EN ISO 13790. Il metodo di calcolo utilizzato in Turchia è contenuto all'interno della norma turca BEP-TR (*Building energy performance calculation methodology of Turkey*) e fa riferimento al modello di calcolo orario semplificato descritto dalla stessa UNI EN ISO 13790. Entrambi i metodi di calcolo sono stati infine confrontati con il modello di simulazione dinamico implementato nel codice di calcolo *EnergyPlus*.

Nel presente capitolo vengono analizzati i tre modelli di calcolo e si presenta la loro applicazione ad un caso di studio. Al fine di confrontare le diverse metodologie di calcolo, sono state analizzate le opzioni per la congruenza dei modelli analizzati.

## 1.1 Classificazione dei modelli di calcolo della prestazione energetica degli edifici

Un modello matematico è una descrizione del comportamento di un sistema caratterizzato da:

- variabili di ingresso;
- descrizione del funzionamento del sistema;
- variabili di uscita.

Obiettivo della modellazione matematica consiste nel determinare una delle tre componenti conoscendo le restanti due. Per fare questo ci sono due possibili approcci:

- approccio diretto (*forward*) o classico;
- approccio governato dai dati (*data driven*) o inverso (*inverse*).

L'approccio diretto consiste nel prevedere le variabili di uscita, nota la struttura del sistema e per dati di ingresso noti; l'approccio inverso consiste nel derivare la struttura del sistema noti i dati di ingresso e di uscita.

All'interno di questo capitolo sono trattati modelli diretti per il calcolo energetico caratterizzati da diversi livelli di dettaglio. La descrizione di ogni modello è limitata unicamente a livello del "fabbricato", ovvero si considera il calcolo dell'energia termica utile per la climatizzazione, trascurando i calcoli relativi al sistema impianto.

In generale, i modelli di calcolo diretti possono essere classificati in funzione dell'ambito di applicazione e delle condizioni al contorno e in funzione degli algoritmi di calcolo utilizzati.

Da un punto di vista dell'ambito di applicazione i modelli possono essere classificati in funzione:

- del sistema fisico analizzato (il fabbricato, il fabbricato e i terminali degli impianti di climatizzazione o più in generale il fabbricato e gli impianti compresi i sistemi di generazione dell'energia);
- del livello di dettaglio spaziale (il singolo ambiente, un insieme di ambienti, l'intero fabbricato).

I modelli possono anche distinguersi in funzione della variazione e della scansione temporale delle condizioni al contorno:

- per quanto concerne la variazione temporale dei valori di ingresso e di uscita, i modelli possono distinguersi tra modelli in cui le grandezze sono costanti nel tempo e modelli in cui tutte le grandezze (temperature, flussi termici ecc.) variano nel tempo. Nel primo caso si parla di modelli di calcolo in regime stazionario, nel secondo caso si parla di modelli di calcolo in regime dinamico;
- per quanto concerne la scansione temporale, i modelli possono essere caratterizzati da dati di ingresso e di uscita aggregati in un periodo di tempo (ad esempio medi mensili o stagionali) o caratterizzati da un profilo temporale variabile per un intervallo di tempo (*time-step*) che può essere ad esempio orario o sub-orario in funzione degli obiettivi dell'analisi.

Tra i modelli di calcolo in regime dinamico vi sono quindi modelli in cui le grandezze variano secondo un andamento periodico (ad esempio con andamento giornaliero) e modelli in cui le grandezze variano in maniera non periodica.

Vi sono poi modelli di calcolo quasi-stazionari che introducono le variabili dinamiche nel modello di calcolo stazionario attraverso parametri aggregati che tengono in considerazione fenomeni dinamici che hanno effetto sull'inerzia dell'edificio.

Da un punto di vista degli algoritmi di calcolo, i modelli possono essere classificati in:

- metodi che risolvono l'equazione di bilancio termico convettivo dell'aria in ambiente interno e in maniera combinata le equazioni di scambio termico conduttivo, convettivo e radiativo di tutte le superfici a contatto con l'aria interna;
- metodi in cui il carico termico totale è dato come somma dei singoli carichi distinti tra loro in funzione delle sollecitazioni (temperatura esterna, ventilazione, radiazione solare e sorgenti interne).

La norma UNI EN ISO 13790 distingue tra i metodi per il calcolo del fabbisogno di energia termica dell'edificio due tipologie fondamentali:

- metodi *quasi stazionari*, nei quali il calcolo dei termini del bilancio termico dell'edificio è effettuato considerando condizioni stazionarie per un periodo di tempo sufficientemente lungo (tipicamente, un mese o un'intera stagione) e si tiene conto degli effetti dinamici attraverso parametri semplificati determinati empiricamente (fattore di utilizzazione degli apporti e/o delle dispersioni);

- metodi *dinamici*, nei quali il calcolo del bilancio termico è effettuato considerando passi di tempo brevi (tipicamente un'ora) e tenendo conto del calore accumulato, e rilasciato, dalla struttura dell'edificio.

La norma prende in considerazione tre differenti tipi di metodi:

- metodo di calcolo quasi stazionario mensile;
- metodo di calcolo dinamico orario semplificato;
- procedure di calcolo per metodi di simulazione dinamica dettagliata.

## 1.2 I modelli di calcolo analizzati

I modelli per il calcolo del fabbisogno di energia termica degli edifici che sono stati confrontati sono:

- metodo mensile quasi stazionario (secondo la norma UNI EN ISO 13790);
- metodo orario semplificato (secondo la norma UNI EN ISO 13790);
- modello di calcolo in regime dinamico implementato nel codice di simulazione *EnergyPlus*.

Le metodologie di calcolo prevedono la suddivisione dell'edificio in zone termiche (o zone climatizzate), ovvero in quelle *parti di un ambiente climatizzato ad una data temperatura di regolazione o a date temperature di regolazione, all'interno del quale si assume lo stesso profilo di occupazione e si assume che la temperatura interna abbia variazioni spaziali trascurabili, e che è controllato da un singolo impianto di riscaldamento, di raffrescamento e/o di ventilazione, o da impianti differenti con uguale prestazione energetica*.

Il calcolo del fabbisogno di energia termica per il riscaldamento e il raffrescamento, secondo le metodologie che sono di seguito descritte, viene effettuato per ogni singola zona termica.

### *1.2.1 Il metodo mensile quasi stazionario*

Il metodo di calcolo mensile quasi-stazionario è basato sul bilancio mensile tra dispersioni termiche (per trasmissione e ventilazione) e guadagni termici (solari e interni) valutati in condizioni medie mensili. Gli effetti dinamici sui fabbisogni di energia netta sono tenuti in considerazione attraverso l'introduzione dei seguenti parametri dinamici:

- un fattore di utilizzazione che tiene conto della non corrispondenza temporale tra scambi termici (per trasmissione e ventilazione) e apporti termici (solari e interni);
- un fattore di riduzione del fabbisogno di energia per il riscaldamento o raffrescamento nel caso di riscaldamento o raffrescamento intermittente.

Tali parametri dipendono dall'inerzia termica dell'edificio, dal rapporto tra apporti termici e dispersioni e dai profili orari di occupazione e gestione dell'impianto.

Il fabbisogno di energia termica mensile per riscaldamento e raffrescamento viene calcolato, mese per mese, rispettivamente secondo le seguenti equazioni:

$$Q_{\mathrm{H,nd}} = Q_{\mathrm{H,ht}} - \eta_{\mathrm{H,gn}} \cdot Q_{\mathrm{gn}} = \left(Q_{\mathrm{H,tr}} + Q_{\mathrm{H,ve}}\right) - \eta_{\mathrm{H,gn}} \cdot \left(Q_{\mathrm{int}} + Q_{\mathrm{sol}}\right) \tag{1.1}$$

$$Q_{\mathrm{C,nd}} = Q_{\mathrm{gn}} - \eta_{\mathrm{C,ls}} \cdot Q_{\mathrm{C,ht}} = \left(Q_{\mathrm{int}} + Q_{\mathrm{sol}}\right) - \eta_{\mathrm{C.ls}} \cdot \left(Q_{\mathrm{C,tr}} + Q_{\mathrm{C,ve}}\right) \tag{1.2}$$

dove $Q_{\mathrm{H/C,nd}}$ è il fabbisogno netto di energia della zona termica per riscaldamento/ raffrescamento, $Q_{\mathrm{H/C,ht}}$ è lo scambio termico totale nel caso di riscaldamento/ raffrescamento, $Q_{\mathrm{H/C,tr}}$ è lo scambio termico per trasmissione nel caso di riscaldamento/raffrescamento, $Q_{\mathrm{H/C,ve}}$ è lo scambio termico per ventilazione nel caso di riscaldamento/raffrescamento, $Q_{\mathrm{gn}}$ sono gli apporti termici totali, $Q_{\mathrm{int}}$ sono gli apporti termici interni, $Q_{\mathrm{sol}}$ sono gli apporti termici solari, $\eta_{\mathrm{H,gn}}$ è il fattore di utilizzazione degli apporti termici, $\eta_{\mathrm{C,ls}}$ è il fattore di utilizzazione delle dispersioni termiche.

Le dispersioni termiche per trasmissione vengono calcolate come

$$Q_{\mathrm{H/C,tr}} = H_{\mathrm{tr,adj}} \cdot \left(\theta_{\mathrm{int,set,H/C}} - \theta_{\mathrm{e}}\right) \cdot t \tag{1.3}$$

dove $H_{\mathrm{tr,adj}}$ è il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione della zona considerata, corretto per tenere conto della differenza di temperatura interno-esterno; $\theta_{\mathrm{int,set,H/C}}$ è la temperatura interna di regolazione per il riscaldamento/raffrescamento della zona considerata; $\theta_{\mathrm{e}}$ è la temperatura media mensile dell'ambiente esterno; $t$ è la durata del mese considerato.

Le dispersioni termiche per ventilazione vengono calcolate come

$$Q_{\mathrm{H/C,ve}} = H_{\mathrm{ve,adj}} \cdot \left(\theta_{\mathrm{int,set,H/C}} - \theta_{\mathrm{e}}\right) \cdot t \tag{1.4}$$

dove $H_{\mathrm{ve,adj}}$ è il coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata.

Nei calcoli effettuati, il termine $Q_{\mathrm{H,C,tr}}$ (dispersioni termiche per trasmissione) comprende anche il termine relativo allo scambio termico radiativo verso la volta celeste, secondo quanto indicato all'interno della specifica tecnica UNI/TS 11300-1, a differenza di quanto previsto nella UNI EN ISO 13790, che sottrae l'extra-flusso termico radiativo verso la volta celeste dagli apporti solari. Il calcolo delle dispersioni per trasmissione è pertanto effettuato secondo l'equazione

$$Q_{\mathrm{H/C,tr}} = H_{\mathrm{tr,adj}} \cdot \left(\theta_{\mathrm{int,set,H/C}} - \theta_{\mathrm{e}}\right) \cdot t + \left\{\sum_{k} F_{\mathrm{r,k}} \cdot \Phi_{\mathrm{r,mn,k}}\right\} \cdot t \tag{1.5}$$

dove $F_{\mathrm{r,k}}$ è il fattore di forma tra il componente edilizio $k$-esimo e la volta celeste; $F_{\mathrm{r,mn,k}}$ è l'extra flusso termico dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste dal componente edilizio $k$-esimo, mediato sul tempo.

Gli apporti termici si calcolano secondo le seguenti equazioni

$$Q_{\mathrm{int}} = \left\{\sum_{k} \Phi_{\mathrm{int,mn,k}}\right\} \cdot t + \left\{\sum_{l} \left(1 - b_{\mathrm{tr,l}}\right) \cdot \Phi_{\mathrm{int,mn,u,l}}\right\} \cdot t \tag{1.6}$$

$$Q_{\mathrm{sol}} = \left\{\sum_{k} \Phi_{\mathrm{sol,mn,k}}\right\} \cdot t + \left\{\sum_{l} \left(1 - b_{\mathrm{tr,l}}\right) \cdot \Phi_{\mathrm{sol,mn,u,l}}\right\} \cdot t \tag{1.7}$$

dove le due sommatorie si riferiscono rispettivamente ai flussi, tutti mediati sul tempo, entranti e/o generati nella zona climatizzata e negli ambienti non climatizzati; $b_{tr,l}$ è il fattore di riduzione per l'ambiente non climatizzato avente la sorgente di calore interna *l*-esima oppure il flusso termico *l*-esimo di origine solare; $\Phi_{int,mn,k}$ è il flusso termico prodotto dalla *k*-esima sorgente di calore interna; $\Phi_{int,mn,u,l}$ è il flusso termico prodotto dalla *l*-esima sorgente di calore interna nell'ambiente non climatizzato adiacente *u*; $\Phi_{sol,mn,k}$ è il flusso termico di origine solare nell'ambiente climatizzato attraverso la *k*-esima superficie d'involucro; $\Phi_{sol,mn,u,l}$ è il flusso termico *l*-esimo di origine solare nell'ambiente non climatizzato adiacente *u*.

Per quanto concerne i flussi solari $\Phi_{sol,mn,k}$ e $\Phi_{sol,mn,u,k}$, il calcolo come previsto dalla la UNI EN ISO 13790 viene effettuato secondo l'equazione seguente

$$\Phi_{sol,k} = F_{sh,ob,k} \cdot A_{sol,k} \cdot I_{sol,k} - F_{r,k} \cdot \Phi_{r,k} \tag{1.8}$$

dove $F_{sh,ob,k}$ è il fattore di riduzione per ombreggiatura relativo a schermature fisse per l'area soleggiata efficace della superficie *k*; $A_{sol,k}$ è l'area di captazione efficace della superficie *k* con dato orientamento e angolo di inclinazione; $I_{sol,k}$ è l'irradianza solare, il valore medio dell'energia relativa all'irraggiamento solare su un passo di tempo del calcolo, per metro quadrato di area di captazione della superficie *k*, con dato orientamento e angolo di inclinazione; $F_{r,k}$ e $\Phi_{r,k}$ sono gli stessi termini indicati all'interno dell'equazione 1.5.

Come precedentemente specificato, secondo la metodologia di calcolo della UNI/TS 11300-1, gli apporti solari sono stati calcolati secondo l'equazione 1.9, essendo gli scambi termici radiativi verso la volta celeste considerati all'interno dell'equazione 1.5.

$$\Phi_{sol,k} = F_{sh,ob,k} \cdot A_{sol,k} \cdot I_{sol,k} \tag{1.9}$$

Per quanto concerne il fattore di utilizzazione degli apporti termici, il calcolo è stato effettuato conformemente alla UNI EN ISO 13790

$$\eta_{H,gn} = \frac{1-\gamma_H^{a_H}}{1-\gamma_H^{a_{H+1}}} \qquad \text{se } \gamma_H > 0 \tag{1.10}$$

$$\eta_{H,gn} = \frac{a_H}{a_H+1} \qquad \text{se } \gamma_H = 0 \tag{1.11}$$

$$\eta_{H,gn} = \frac{1}{\gamma_H} \qquad \text{se } \gamma_H < 0 \tag{1.12}$$

con

$$\gamma_H = \frac{Q_{H,gn}}{Q_{H,ht}} \tag{1.13}$$

$$a_{\mathrm{H}} = a_{\mathrm{H,0}} + \frac{\tau}{\tau_{\mathrm{H,0}}} \tag{1.14}$$

dove $a_{\mathrm{H,0}}$ è un parametro numerico di riferimento adimensionale; $\tau$ è la costante di tempo della zona dell'edificio; $\tau_{\mathrm{H,0}}$ è una costante di tempo di riferimento.

Il fattore di utilizzazione delle dispersioni termiche è calcolato come segue

$$\eta_{\mathrm{C,ls}} = \frac{1-\gamma_{\mathrm{C}}^{-a_{\mathrm{C}}}}{1-\gamma_{\mathrm{C}}^{-(a_{\mathrm{C}}+1)}} \qquad \text{se } \gamma_{\mathrm{C}} > 0 \text{ e } \gamma_{\mathrm{C}} \neq 1 \tag{1.15}$$

$$\eta_{\mathrm{C,ls}} = \frac{a_{\mathrm{C}}}{a_{\mathrm{C}}+1} \qquad \text{se } \gamma_{\mathrm{C}} = 1 \tag{1.16}$$

$$\eta_{\mathrm{C,ls}} = 1 \qquad \text{se } \gamma_{\mathrm{C}} < 0 \tag{1.17}$$

con

$$\gamma_{\mathrm{C}} = \frac{Q_{\mathrm{C,gn}}}{Q_{\mathrm{C,ht}}} \tag{1.18}$$

$$a_{\mathrm{C}} = a_{\mathrm{C,0}} + \frac{\tau}{\tau_{\mathrm{C,0}}} \tag{1.19}$$

dove $a_{\mathrm{C,0}}$ è un parametro numerico di riferimento adimensionale; $\tau_{\mathrm{C,0}}$ è una costante di tempo di riferimento.

### *1.2.2 Il metodo orario semplificato*

Il modello orario semplificato si basa su un modello resistivo-capacitivo equivalente (R-C) secondo lo schema di Crank-Nicholson (figura 1.1). Questo modello utilizza un passo di tempo orario e tutti i dati di ingresso dell'edificio e dell'impianto possono essere modificati per ciascuna ora utilizzando profili di utilizzo orario.

Il fabbisogno per il riscaldamento e/o il raffrescamento $Q_{\mathrm{HC,nd}}$ è determinato integrando sul tempo la potenza $\Phi_{\mathrm{HC,nd}}$ (positiva per il riscaldamento e negativa per il raffrescamento), che occorre fornire, o estrarre, dal nodo corrispondente all'aria interna, di temperatura $\theta_{\mathrm{air}}$, per mantenere una data temperatura di regolazione minima o massima, che viene calcolata per ogni ora. La temperatura di regolazione è una media pesata tra la temperatura dell'aria e la temperatura media radiante. Il fattore di peso standard per ciascuna è 0,5.

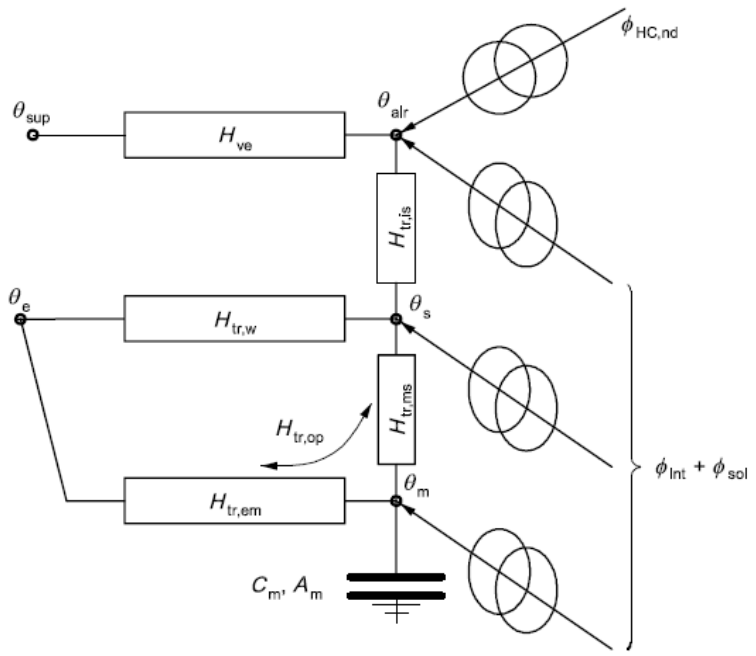



Figura 1.1. Modello a cinque resistenze e una capacità (5R1C).
Fonte: UNI EN ISO 13790.

Ogni termine del bilancio è connesso ad un nodo. I nodi presenti nel modello sono tre, ovvero

- nodo corrispondente all'aria interna, di temperatura $\theta_{air}$;
- nodo corrispondente alle superfici interne degli elementi di chiusura dell'ambiente climatizzato, di temperatura $\theta_s$;
- nodo corrispondente alla massa dei componenti involucro della struttura (ad esclusione dei componenti di involucro con massa trascurabile, vale a dire porte e finestre), di temperatura $\theta_m$.

Lo scambio termico per ventilazione, descritto dal coefficiente $H_{ve}$, connette direttamente il nodo corrispondente all'ambiente interno, a temperatura $\theta_{air}$, al nodo che rappresenta l'aria immessa, a temperatura $\theta_{sup}$.

Lo scambio termico per trasmissione globale è suddiviso nella quota relativa all'involucro vetrato (o relativa agli elementi di involucro la cui inerzia termica risulta trascurabile, come porte e finestre), descritta dal coefficiente $H_{tr,w}$, e nella restante parte, descritta da $H_{tr,op}$, relativa a componenti di involucro con inerzia termica non trascurabile che è a sua volta suddivisa in due parti: $H_{tr,em}$ e $H_{tr,ms}$ come indicato in figura 1.2.

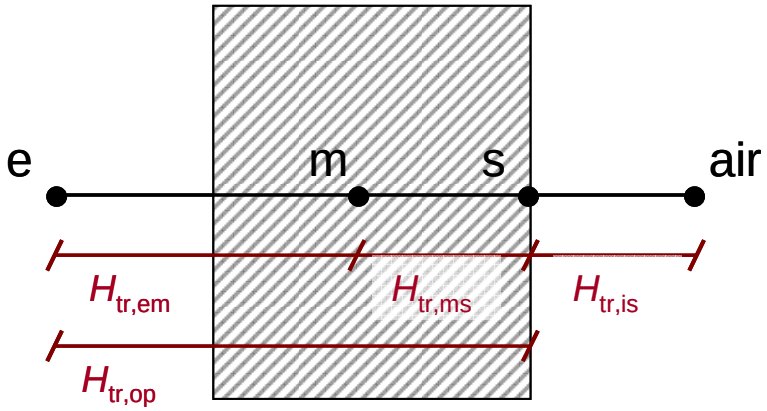



Figura 1.2. Schematizzazione dei coefficienti di accoppiamento termico per l'involucro opaco.

Gli apporti termici solari ed interni sono distribuiti sul nodo dell'aria, a temperatura $\theta_{air}$, sul nodo centrale, a temperatura $\theta_s$ (una combinazione di $\theta_{air}$ e della temperatura media radiante $\theta_{rmn}$ secondo quanto specificato dalla UNI EN ISO 13790, Appendice C ) e sul nodo che rappresenta la massa della zona dell'edificio, a temperatura $\theta_m$.

La massa termica è rappresentata da una singola capacità termica, $C_m$, localizzata tra $H_{tr,ms}$ e $H_{tr,em}$. Il flusso termico dovuto a sorgenti interne di calore, $\Phi_{int}$, e il flusso termico dovuto a sorgenti termiche solari, $\Phi_{sol}$, sono suddivisi tra i tre nodi.

Le variabili principali del modello sono indicate nel seguito.

$H_{tr,w}$ è il coefficiente di accoppiamento termico di porte, finestre, facciate continue e pareti vetrate

$H_{tr,op}$ è il coefficiente di accoppiamento termico di elementi edilizi opachi con inerzia termica non trascurabile

$H_{tr,em}$ è il coefficiente di accoppiamento termico tra il nodo dell'aria esterna (*e*) e il nodo della massa (*m*) ricavabile secondo l'equazione seguente

$$H_{tr,em} = \frac{1}{\frac{1}{H_{tr,op}} - \frac{1}{H_{tr,ms}}} \tag{1.20}$$

$H_{tr,ms}$ è il coefficiente di accoppiamento termico tra il nodo *m* ed *s* ed è pari a

$$H_{tr,ms} = h_{ms} \cdot A_m \tag{1.21}$$

dove $h_{ms}$ è il coefficiente di accoppiamento termico tra i nodi *m* ed *s*, con il valore fissato a 9,1 W/(m$^2$K); $A_m$ è l'area della massa efficace ricavabile secondo l'equazione seguente

$$A_m = \frac{C_m^{\ 2}}{\left(\sum A_j \cdot \kappa_j^{\ 2}\right)} \tag{1.22}$$

dove $C_m$ è la capacità termica interna; $A_j$ è l'area dell'elemento *j*-esimo; $k_j$ è la capacità termica interna per unità di area dell'elemento edilizio *j*.

$H_{tr,is}$ è il coefficiente di accoppiamento termico tra il nodo dell'aria interna ed il nodo della superficie *s* dato dall'equazione

$$H_{tr,is} = h_{is} \cdot A_{tot} \tag{1.23}$$

dove $h_{is}$ è il coefficiente di scambio termico tra il nodo dell'aria e il nodo della superficie con un valore fissato di 3,45 W/(m$^2$K); $A_{tot}$ è l'area di tutte le superfici che si affacciano sulla zona dell'edificio.

La rete *RC* permette di determinare, per ogni *step* di calcolo, la temperatura interna rispetto al relativo fabbisogno di riscaldamento o di raffrescamento $\Phi_{HC,nd}$. Lo schema di risoluzione è tale per cui la temperatura interna è determinata come funzione lineare di $\Phi_{HC,nd}$.

La temperatura di regolazione può essere rappresentata dalla stessa temperatura dell'aria interna $\theta_{air}$, o dalla temperatura operante. È possibile inoltre imporre una potenza termica o frigorifera massima disponibile.

Dal calcolo della temperatura dell'aria interna possono risultare le seguenti 5 condizioni come riportate in figura 1.3. Si fa presente che tale sistema di regolazione è puramente ideale, essendo nella realtà un sistema di regolazione altamente instabile.

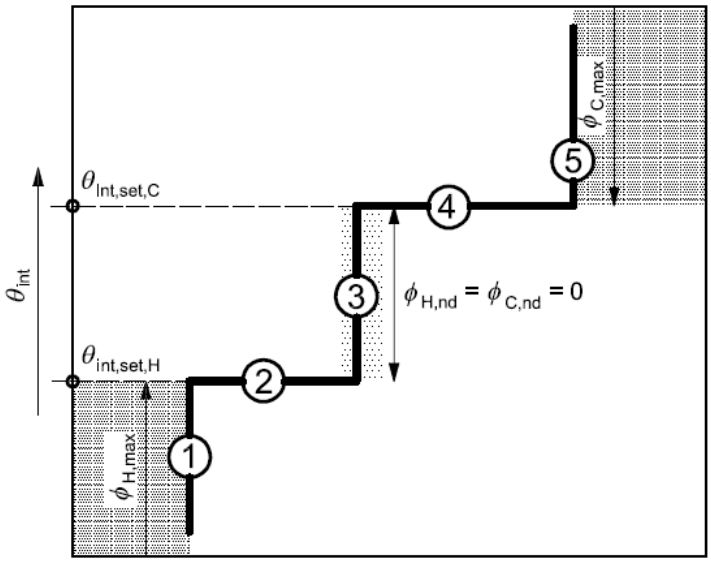



Figura 1.3. Comportamento della temperatura nella zona dell'edificio rispetto al comportamento dell'impianto. Fonte: UNI EN ISO 13790

1) La zona dell'edificio richiede il riscaldamento e la potenza termica non è sufficiente per raggiungere il valore di regolazione. Il fabbisogno di riscaldamento è limitato alla potenza termica massima disponibile e la temperatura interna calcolata ($\theta_{int}$) è inferiore al valore di regolazione per il riscaldamento $\theta_{int,H,set}$. Questo di solito si verifica nel periodo di avviamento.
2) La zona dell'edificio richiede il riscaldamento e la potenza termica è sufficiente. La temperatura interna è uguale a $\theta_{int,H,set}$ e il fabbisogno di riscaldamento calcolato è inferiore al suo valore massimo.

3) La zona dell'edificio non richiede né il riscaldamento né il raffrescamento (condizioni di libera fluttuazione). Si calcola pertanto la temperatura interna ($\theta_{int}$).
4) La zona dell'edificio richiede il raffrescamento e la potenza frigorifera è sufficiente. La temperatura interna è uguale a $\theta_{int,C,set}$ e il fabbisogno di raffrescamento calcolato è inferiore al suo valore massimo.
5) La zona dell'edificio richiede il raffrescamento e la potenza frigorifera non è sufficiente. Il fabbisogno di raffrescamento è limitato alla potenza di raffrescamento massima disponibile. La temperatura interna calcolata ($\theta_{int}$) è superiore al valore di regolazione per il raffrescamento $\theta_{int,C,set}$.

La procedura di calcolo prevede che, per ogni ora vengano calcolati i flussi termici da sorgenti di calore interne e solari, suddivisi tra i nodi a temperatura $\theta_{air}$, $\theta_s$ e $\theta_m$. In particolare il 50% dei flussi termici da sorgenti interne sono connessi al nodo dell'aria interna (equazione 1.24); una parte dei flussi termici interni e una parte dei flussi termici solari sono connessi al nodo relativo alla massa (equazione 1.25) e un'ultima parte al nodo relativo alla superficie dell'involucro (equazione 1.26).

$$\Phi_{ia} = 0{,}5\Phi_{int} \tag{1.24}$$

$$\Phi_{m} = \frac{A_m}{A_{tot}}\left(0{,}5\Phi_{int} + \Phi_{sol}\right) \tag{1.25}$$

$$\Phi_{st} = \left(1 - \frac{A_m}{A_{tot}} - \frac{H_{tr,w}}{9{,}1A_{tot}}\right)\cdot\left(0{,}5\Phi_{int} + \Phi_{sol}\right) \tag{1.26}$$

dove $\Phi_{int}$ sono i flussi termici da sorgenti interne e $\Phi_{sol}$ sono i flussi termici solari calcolati secondo l'equazione 1.8.

Per ogni intervallo di tempo la temperatura $\theta_{m,t}$ viene calcolata a partire dal valore dell'intervallo di tempo precedente $\theta_{m,t-1}$. A questo punto viene calcolata la temperatura media $\theta_m$ del nodo relativo alla massa tra gli intervalli $\theta_{m,t}$ e $\theta_{mt-1}$, quindi viene calcolata la temperatura del nodo relativo alla superficie $\theta_s$ (legata alla temperatura della massa $\theta_m$, alla temperatura esterna $\theta_e$, alla temperatura di aria immessa $\theta_{sup}$ e ai carichi). La temperatura dell'aria interna $\theta_{air}$ è funzione della temperatura $\theta_s$, $\theta_{sup}$ e degli stessi carichi (da fonti interne e solari nonché da eventuale impianto di riscaldamento/raffrescamento).

In caso si intenda calcolare il fabbisogno di riscaldamento/raffrescamento in funzione della temperatura operante, si consideri $\theta_{op}$ quale media tra $\theta_{air}$ e $\theta_s$.

Per ogni intervallo temporale si calcola pertanto

$$\theta_{m,t} = \frac{\theta_{m,t-1}\left[\left(C_m / 3600\right) - 0{,}5\left(H_{tr,3} + H_{tr,em}\right)\right] + \Phi_{m,tot}}{\left(C_m / 3600\right) + 0{,}5\left(H_{tr,3} + H_{tr,em}\right)} \tag{1.27}$$

con

$$\Phi_{\mathrm{m,tot}} = \Phi_{\mathrm{m}} + H_{\mathrm{tr,em}}\theta_{\mathrm{e}} + H_{\mathrm{tr,3}} \frac{\Phi_{\mathrm{st}} + H_{\mathrm{tr,w}}\theta_{\mathrm{e}} + H_{\mathrm{tr,1}}\left\{\left[\left(\Phi_{\mathrm{ia}} + \Phi_{\mathrm{HC,nd}}\right)/H_{\mathrm{ve}}\right] + \theta_{\mathrm{sup}}\right\}}{H_{\mathrm{tr,2}}} \tag{1.28}$$

$$H_{\mathrm{tr,1}} = \frac{1}{1/H_{\mathrm{ve}} + 1/H_{\mathrm{tr,is}}} \tag{1.29}$$

$$H_{\mathrm{tr,2}} = H_{\mathrm{tr,1}} + H_{\mathrm{tr,w}} \tag{1.30}$$

$$H_{\mathrm{tr,3}} = \frac{1}{1/H_{\mathrm{tr,2}} + 1/H_{\mathrm{tr,ms}}} \tag{1.31}$$

$$\theta_{\mathrm{m}} = \left(\theta_{\mathrm{m,t}} + \theta_{\mathrm{m,t-1}}\right)/2 \tag{1.32}$$

$$\theta_{\mathrm{s}} = \frac{H_{\mathrm{tr,ms}}\theta_{\mathrm{m}} + \Phi_{\mathrm{st}} + H_{\mathrm{tr,w}}\theta_{\mathrm{e}} + H_{\mathrm{tr,1}}\left[\theta_{\mathrm{sup}} + \left(\Phi_{\mathrm{ia}} + \Phi_{\mathrm{HC,nd}}\right)/H_{\mathrm{ve}}\right]}{H_{\mathrm{tr,ms}} + H_{\mathrm{tr,w}} + H_{\mathrm{tr,1}}} \tag{1.33}$$

$$\theta_{\mathrm{air}} = \frac{H_{\mathrm{tr,is}}\theta_{\mathrm{s}} + H_{\mathrm{ve}}\theta_{\mathrm{sup}} + \Phi_{\mathrm{ia}} + \Phi_{\mathrm{HC,nd}}}{H_{\mathrm{tr,is}} + H_{\mathrm{ve}}} \tag{1.34}$$

$$\theta_{\mathrm{op}} = 0{,}3 \cdot \theta_{\mathrm{air}} + 0{,}7 \cdot \theta_{\mathrm{s}} \tag{1.35}$$

La procedura di calcolo consiste nei seguenti passi:

- Passo 1: Verificare se il raffrescamento o il riscaldamento siano necessari.

Assumere $\Phi_{\mathrm{HC,nd}} = 0$ e applicare le equazioni da 1.27 a 1.34 (nel caso si consideri la temperatura dell'aria quale temperatura di regolazione). Il risultato ottenuto è $\theta_{\mathrm{air,0}}$, ovvero la temperatura dell'aria nelle condizioni di libera fluttuazione.

Se $\theta_{\mathrm{int,H,set}} \leq \theta_{\mathrm{air,0}} \leq \theta_{\mathrm{int,C,set}}$, non è richiesto riscaldamento o raffrescamento così che $\Phi_{\mathrm{HC,nd,ac}} = 0$ e $\theta_{\mathrm{air,ac}} = \theta_{\mathrm{air,0}}$, e non sono necessari ulteriori calcoli.

Se no: applicare il passo 2.

- Passo 2: Scegliere il valore di regolazione e calcolare il fabbisogno di riscaldamento o di raffrescamento.

Se $\theta_{\mathrm{air,0}} > \theta_{\mathrm{int,C,set}}$, assumere $\theta_{\mathrm{air,set}} = \theta_{\mathrm{int,C,set}}$

Se $\theta_{\mathrm{air,0}} < \theta_{\mathrm{int,H,set}}$, assumere $\theta_{\mathrm{air,set}} = \theta_{\mathrm{int,H,set}}$

Applicare le equazioni da 1.27 a 1.34 assumendo $\Phi_{\mathrm{HC,nd}} = \Phi_{\mathrm{HC,nd10}}$ con $\Phi_{\mathrm{HC,nd10}} = 10$ [W/m$^2$] $\cdot A_{\mathrm{f}}$ dove $A_{\mathrm{f}}$ [m$^2$] è la superficie calpestabile della zona dell'edificio.

Nominare la risultante $\theta_{\mathrm{air}}$ come $\theta_{\mathrm{air,10}}$ ($\theta_{\mathrm{air,10}}$ è la temperatura dell'aria ottenuta con una potenza termica di 10 W/m$^2$).

Calcolare $\Phi_{HC,nd,un}$, fabbisogno illimitato di riscaldamento o di raffrescamento per raggiungere la temperatura di regolazione richiesta ($\Phi_{HC,nd,un}$ è positivo per il riscaldamento e negativo per il raffrescamento) secondo l'equazione seguente

$$\Phi_{HC,nd,un} = \Phi_{HC,nd10} \frac{\theta_{air,set} - \theta_{air,0}}{\theta_{air,10} - \theta_{air,0}} \tag{1.36}$$

- Passo 3: Verificare se la potenza termica o frigorifera disponibile sia sufficiente (caso 2 o caso 4 della figura 1.3).

Se $\Phi_{HC,nd,un}$ è tra $\Phi_{H,max}$ (potenza termica massima) e $\Phi_{C,max}$ (potenza frigorifera massima):

$$\Phi_{HC,nd,ac} = \Phi_{HC,nd,un} \tag{1.37}$$

$$\theta_{air,ac} = \theta_{air,set} \tag{1.38}$$

e il calcolo è terminato.

Se no: applicare il passo 4.

- Passo 4: Calcolare la temperatura interna (caso 1 o caso 5 della figura 1.3).

Se $\Phi_{HC,nd,un}$ è positivo, assumere $\Phi_{HC,nd,ac} = \Phi_{H,max}$. Se $\Phi_{HC,nd,un}$ è negativo, assumere $\Phi_{HC,nd,ac} = \Phi_{C,max}$.

Calcolare $\theta_{air,ac}$ utilizzando le equazioni da 1.27 a 1.34.

Il fabbisogno di energia per il riscaldamento o il raffrescamento per una data ora, $Q_{HC,nd}$, espresso in megajoule, è uguale a 0,0036 × $\Phi_{HC,nd,ac}$. Il valore è positivo nel caso di fabbisogno di riscaldamento e negativo nel caso di fabbisogno di raffrescamento.

### *1.2.3 Il modello di calcolo implementato all'interno di EnergyPlus*

*EnergyPlus* è un codice di simulazione termo-energetica degli edifici a struttura modulare, realizzato nel 2001, a seguito di un lavoro iniziato nel 1996, dall'*US Department of Energy*, dal *Cerl* (*US Army Construction Engineering Research Laboratories*), dall'Università dell'Illinois, dal *Lawrence Berkeley National Laboratory*, dall'Università statale dell'Oklaoma e dalla *Gard Analytics*.

Il programma è essenzialmente modulare, per facilitare l'inserimento di nuovi moduli, anche sviluppati in parallelo da diversi estensori, ed eventuali collegamenti ad altri applicativi. In figura 1.4 è rappresentato uno schema delle relazioni tra i vari moduli del software *EnergyPlus*; al centro sono indicati i tre moduli principali.

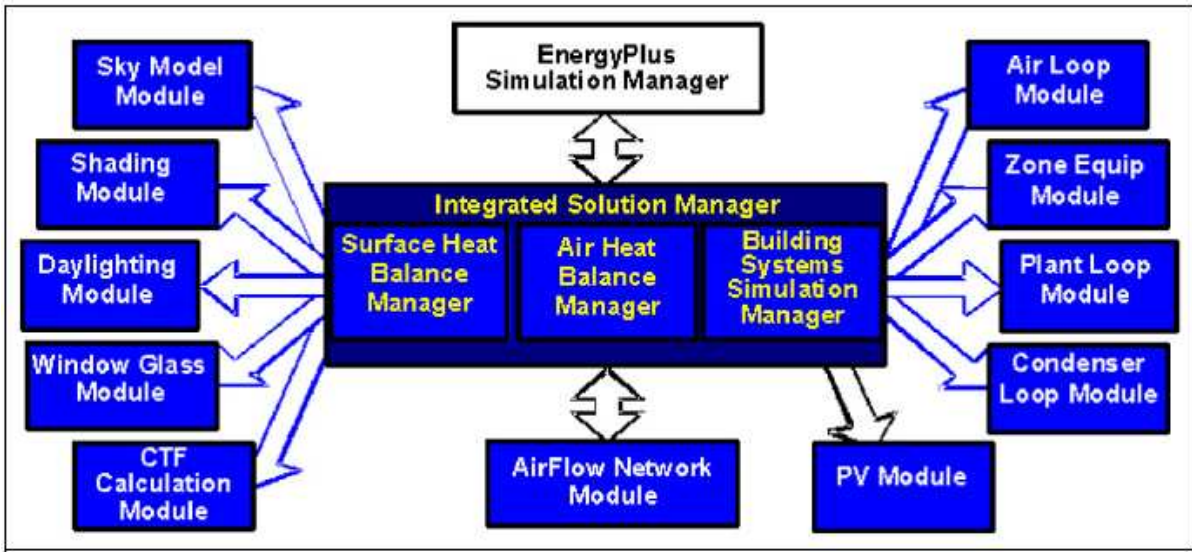



Figura 1.4. Schema delle relazioni tra i vari moduli di *EnergyPlus* (Fonte: *EnergyPlus* User Guide).

Il simulatore principale del programma è composto dai seguenti tre moduli fondamentali:

- il *surface heat balance manager*, che risolve il bilancio termico in corrispondenza della superficie di ciascuna parete;
- l'*air heat balance manager*, che risolve il bilancio dell'ambiente attraverso la simulazione simultanea degli scambi termici radianti e convettivi;
- il *building systems simulation manager* per la simulazione dei componenti impiantistici.

Questi tre moduli principali interagiscono con altri secondari e sono contenuti all'interno dell'*integrated solution manager*, che fa sì che i tre moduli siano risolti simultaneamente, e non in cascata, per ottenere una simulazione il più possibile realistica. Si procede secondo successive iterazioni tra la domanda di energia dell'edificio e l'offerta di energia dell'impianto di climatizzazione: alla prima iterazione si stima il carico termico dell'ambiente avendo fissato la temperatura interna pari alla temperatura di *set-point*; assunto questo carico termico come potenza richiesta all'impianto, viene simulato il comportamento dell'impianto di climatizzazione e viene stimata l'effettiva potenza termica che l'impianto è in grado di fornire a quell'istante temporale; con questa potenza termica viene determinata l'effettiva temperatura della zona termica, avendo approssimato la derivata temporale della temperatura dell'aria nel termine che rappresenta la variazione dell'energia interna del sistema, attraverso una differenza finita del terzo ordine.

L'*air heat balance engine* effettua il calcolo termico relativo a ciascuna zona dell'edificio secondo il modello del bilancio termico sull'aria ambiente. Il metodo si basa sulle seguenti assunzioni:

- temperatura dell'aria ambiente uniforme (perfetta miscelazione);
- temperatura di ciascuna superficie uniforme;
- irraggiamento uniforme, sia a bassa sia ad alta lunghezza d'onda;
- superfici uniformemente diffondenti;
- trasmissione del calore per conduzione monodimensionale.

L'equazione di bilancio termico dell'aria può essere scritta, trascurando il flusso termico per infiltrazione e ventilazione tra zone adiacenti, come:

$$C_{\mathrm{ai}} \cdot \frac{d\theta_{\mathrm{ai}}}{d\tau} = \sum_{i=1}^{N} \Phi_{\mathrm{conv,IG}} + \sum_{i=1}^{N_{\mathrm{surface}}} h_{\mathrm{c,i}} \cdot A_{\mathrm{i}} \cdot (\theta_{\mathrm{si}} - \theta_{\mathrm{ai}}) + \dot{m} \cdot c \cdot (\theta_{\mathrm{ae}} - \theta_{\mathrm{ai}}) + \Phi_{\mathrm{syst}} \tag{1.39}$$

dove, $N$ è il numero delle sorgenti interne convettive, $\Phi_{\mathrm{conv,IG}}$ è il flusso termico convettivo emesso dalla $i$-esima sorgente interna; $h_{\mathrm{c,i}} \times A_{\mathrm{i}} \times (\theta_{\mathrm{si}} - \theta_{\mathrm{ai}})$ è lo scambio termico convettivo dovuto alla $i$-esima superficie della zona termica alla temperatura $\theta_{\mathrm{si}}$; $\dot{m} \times c \times (\theta_{\mathrm{ae}} - \theta_{\mathrm{ai}})$ è lo scambio termico per ventilazione; $\Phi_{\mathrm{syst}}$ è il carico dell'impianto. La capacità termica $C_{\mathrm{ai}}$ prende in considerazione la capacità termica dell'aria della zona e delle masse termiche in equilibrio con l'aria ambiente.

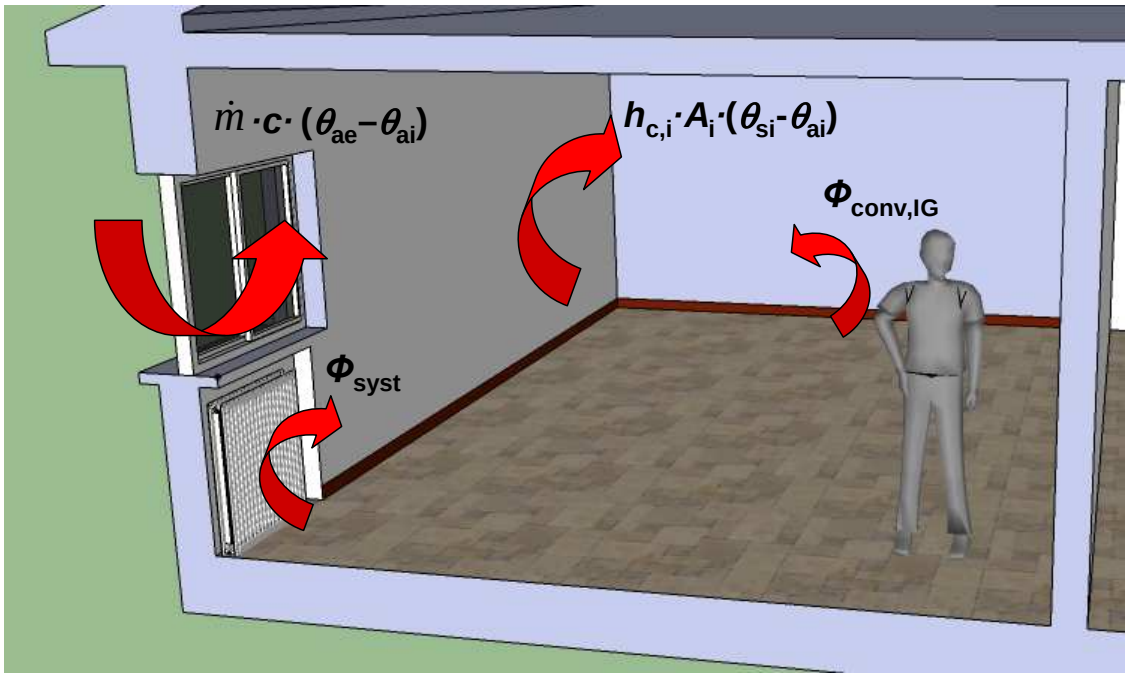



Figura 1.5. Visualizzazione dei termini del bilancio termico convettivo sull'aria ambiente

Connesso all'*air heat balance manager* è il *surface heat balance manager* che comprende i moduli per la determinazione delle temperature superficiali (quelle della faccia interna incognite nello schema risolutivo dell'*air heat balance*) e dei flussi termici in corrispondenza delle facce interna ed esterna di ogni parete.

Il bilancio sulla superficie esterna dell'involucro è rappresentato in figura 1.6 e dato dalla seguente equazione:

$$q_{\alpha\mathrm{sol}} + q_{\mathrm{LWR}} + q_{\mathrm{conv}} + q_{\mathrm{cond}} = 0 \tag{1.40}$$

dove

$q_{\alpha\mathrm{sol}}$ è il flusso solare (diretto e diffuso) assorbito;

$q_{\mathrm{LWR}}$ è il flusso radiativo alle alte lunghezze d'onda scambiato con l'aria e le superfici circostanti;

$q_{\mathrm{conv}}$ è il flusso termico convettivo scambiato con l'aria;

$q_{\mathrm{cond}}$ è il flusso termico di tipo conduttivo scambiato all'interno della parete.

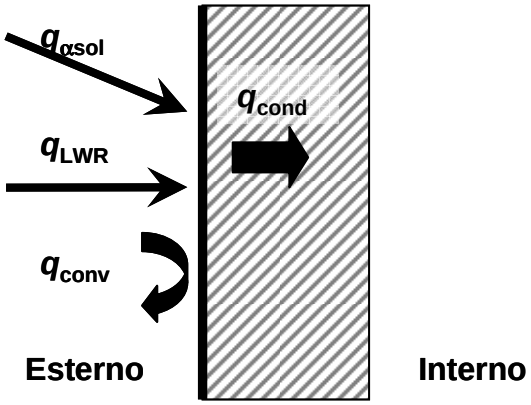



Figura 1.6. Profilo di parete e visualizzazione dei termini del bilancio sulla superficie esterna

Il bilancio sulla superficie interna dell'involucro è rappresentato in figura 1.7 e dato dall'equazione seguente:

$$q_{\mathrm{LWX}} + q_{\mathrm{SW}} + q_{\mathrm{LWS}} + q_{\mathrm{cond}} + q_{\mathrm{sol}} + q_{\mathrm{conv}} = 0 \tag{1.41}$$

dove

$q_{\mathrm{LWX}}$ è il flusso termico radiativo alle alte lunghezze d'onda scambiato con le altre superfici della zona termica;

$q_{\mathrm{SW}}$ è il flusso termico radiativo alle basse lunghezze d'onda emesso dai corpi illuminanti e assorbito dalla superficie;

$q_{\mathrm{LWS}}$ è il flusso termico radiativo alle alte lunghezze d'onda scambiato con le apparecchiature nella zona termica;

$q_{\mathrm{cond}}$ è il flusso termico conduttivo scambiato all'interno della parete;

$q_{\mathrm{sol}}$ è il flusso termico solare trasmesso all'interno dell'ambiente e assorbito dalla superficie;

$q_{\mathrm{conv}}$ è il flusso termico convettivo.

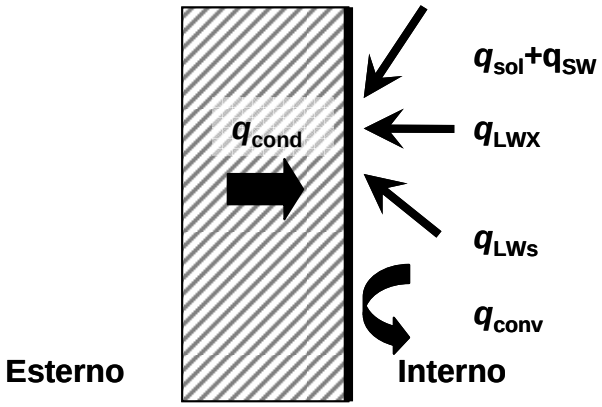



Figura 1.7. Profilo di parete e visualizzazione dei termini del bilancio sulla superficie interna

I flussi termici scambiati attraverso i componenti di involucro sono determinati utilizzando la tecnica dei fattori di risposta, basata sul concetto di *funzione di trasferimento*, algoritmo in grado di legare la sollecitazione indotta sul sistema fisico parete con la risposta del sistema. Sono disponibili altri

algoritmi per determinare il flusso per conduzione, attraverso metodi alle differenze finite, e per accoppiare il trasporto di massa di vapore alla trasmissione del calore.

Vari altri moduli interagiscono con il *surface heat balance manager*, ad esempio quelli che determinano la posizione del sole e le condizioni di radiazione solare ed illuminazione naturale, le ombre proprie e portate sui componenti d'involucro, le proprietà dei componenti trasparenti ecc.

## 1.3 Confronto tra i modelli e opzioni per la congruenza

Per confrontare i modelli di calcolo e quindi i risultati ottenuti in termini di fabbisogno di energia termica, è stato condotto uno studio al fine di rendere i dati di ingresso e le condizioni al contorno omogenee.

Nelle pagine successive, i modelli analizzati sono confrontati punto per punto e sono indicate le opzioni per la congruenza suddivise secondo quanto segue:

1. Zonizzazione termica
2. *Step* di calcolo
3. Condizioni al contorno: temperatura interna dell'ambiente climatizzato
4. Condizioni al contorno: dati climatici
5. Durata delle stagioni di riscaldamento e raffrescamento
6. Scambio termico per trasmissione attraverso l'involucro opaco
    - 6.1 Scambio termico per trasmissione verso l'ambiente esterno
    - 6.2 Scambio termico per trasmissione per componenti a contatto con il terreno
7. Scambio termico per trasmissione attraverso l'involucro trasparente
    - 7.1 Trasmittanza termica dei componenti trasparenti
    - 7.2 Chiusure oscuranti
8. Dispersioni per ventilazione
9. Apporti interni
10. Apporti solari
    - 10.1 Area di captazione solare effettiva dei componenti trasparenti
    - 10.2 Schermature solari
    - 10.3 Area di captazione solare effettiva dei componenti opachi
    - 10.4 Fattori di ombreggiatura
11. Parametri termici dinamici

<table>
<tr><th>UNI EN ISO 13790 – metodo mensile quasi stazionario</th><th>UNI EN ISO 13790 – metodo orario semplificato</th><th>Energy Plus – metodo dinamico</th></tr>
<tr><td colspan="3">1. Zonizzazione termica</td></tr>
<tr><td colspan="3">L’intero edificio è stato modellato come una zona termica in quanto sussistono le seguenti condizioni in accordo alla UNI EN ISO 13790:<br>- le temperature di regolazione per il riscaldamento degli ambienti non differiscono di oltre 4 K;<br>- gli ambienti sono tutti non meccanicamente raffrescati e le temperature di regolazione per il raffrescamento degli ambienti non differiscono di oltre 4 K;<br>- gli ambienti sono serviti dallo stesso impianto di riscaldamento e dallo stesso impianto di raffrescamento;<br>- gli ambienti sono serviti ventilazione di tipo naturale avente la stessa portata in ogni ambiente.</td></tr>
<tr><td colspan="3">2. Step di calcolo</td></tr>
<tr><td>Il calcolo considera un passo temporale mensile. Il risultato in termini di fabbisogno di energia viene calcolato per ogni mese dell’anno.</td><td>Il calcolo considera un passo temporale orario. Il risultato in termini di fabbisogno di energia viene calcolato per ogni ora, tutti i giorni dell’anno.</td><td>Il passo di calcolo viene scelto dall’utente in funzione dell’obiettivo dell’analisi. Può essere orario, sub – orario, giornaliero, mensile, stagionale, annuale ecc.</td></tr>
<tr><td colspan="3">Opzioni per la congruenza dei modelli<br>Lo step di calcolo utilizzato per i modelli è rispettivamente mensile per quanto concerne il metodo mensile quasi stazionario e orario per quanto concerne i modelli orario semplificato e dinamico.<br>Al fine di confrontare i risultati in termini di fabbisogno di energia termica, si sono aggregati in dati mensili i risultati orari relativi al metodo orario semplificato e ad EnergyPlus.<br>Al fine di confrontare la durata del periodo di riscaldamento e raffrescamento relativi al metodo orario semplificato e il metodo dinamico, si è utilizzato un passo temporale orario.</td></tr>
<tr><td colspan="3">3. Condizioni al contorno: temperatura interna dell’ambiente climatizzato</td></tr>
<tr><td colspan="2">Gli ambienti interni si considerano climatizzati alla temperatura di set-point con diverse modalità di regolazione della temperatura:<br>riscaldamento/raffrescamento continui<br>riscaldamento/raffrescamento quasi continui<br>riscaldamento/raffrescamento intermittenti<br>Si fa riferimento a norme nazionali per la definizione di temperature di set-point interno.</td><td rowspan="2">È possibile individuare diverse tipologie di regolazione della temperatura interna (vedi punto 5) fissando diversi set-point.</td></tr>
<tr><td>Nel caso di riscaldamento/raffrescamento</td><td>Per riscaldamento/raffrescamento intermittente, i</td></tr>
</table>

<table>
<tr><th>UNI EN ISO 13790 – metodo mensile quasi stazionario</th><th>UNI EN ISO 13790 – metodo orario semplificato</th><th>Energy Plus – metodo dinamico</th></tr>
<tr><td>intermittenti si considerano fattori adimensionali di riduzione del fabbisogno.</td><td>valori di regolazione devono basarsi su programmi orari e settimanali.<br>Al fine di confrontare i metodi, è stata considerata quale temperatura di regolazione la temperatura interna ($\theta_{air}$) e non la temperatura operante. Pertanto non è stata considerata nei calcoli l'equazione 1.35.</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">Opzioni per la congruenza dei modelli<br>La temperatura di set-point è stata considerata pari a 20°C per tutta la stagione di riscaldamento; pari a 26°C per tutta la stagione di raffrescamento. Si considera il funzionamento continuo dell'impianto 24 ore al giorno.<br>Al fine di determinare il fabbisogno di energia dell'edificio in condizioni ideali e indipendenti dalle caratteristiche del sistema di riscaldamento/climatizzazione, attraverso EnergyPlus si è considerato un sistema dalla capacità in riscaldamento e raffrescamento infinita.</td></tr>
<tr><td colspan="3">4. Condizioni al contorno: dati climatici</td></tr>
<tr><td>I dati climatici richiesti per il calcolo sono:<br>- temperatura dell'aria esterna media mensile;<br>- irradianza solare totale media mensile incidente; su superfici comunque orientate.</td><td>I dati climatici richiesti per il calcolo sono:<br>- temperatura dell'aria esterna oraria;<br>- irradianza solare diretta oraria;<br>- irradianza solare diffusa oraria;<br>- irradianza solare totale oraria.</td><td rowspan="2">I dati climatici richiesti per il calcolo sono:<br>- temperatura esterna oraria;<br>- velocità del vento a 10 metri dal suolo;<br>- umidità relativa dell'aria al suolo;<br>- numero di ore di sole verificatesi nell'intera giornata;<br>- irradiazione solare oraria diretta e diffusa su superfici comunque orientate;<br>- posizione del sole per ogni ora del giorno;<br>- temperatura della volta celeste oraria.</td></tr>
<tr><td colspan="2">- differenza tra la temperatura della volta celeste e la temperatura dell'aria esterna (in assenza di dati calcolati, pari a 11 K per zone climatiche intermedie)</td></tr>
<tr><td colspan="3">Opzioni per la congruenza dei modelli<br>I dati climatici orari sono stati ricavati da EnergyPlus e utilizzati per entrambi i metodi semplificati (UNI EN ISO 13790)<br>In particolare, per il metodo orario semplificato sono stati ricavati da EnergyPlus:<br>- temperatura esterna oraria<br>- irradianza totale oraria su ogni superficie<br>- temperatura della volta celeste oraria.</td></tr>
</table>

| UNI EN ISO 13790 – metodo mensile quasi stazionario | UNI EN ISO 13790 – metodo orario semplificato | Energy Plus – metodo dinamico |
|---|---|---|
| Per il metodo medio mensile sono stati ricavati da *EnergyPlus* gli stessi dati aggregati per ogni mese. | | |
| **5. Durata delle stagioni di riscaldamento e raffrescamento** | | |
| Il calcolo del fabbisogno per riscaldamento e raffrescamento viene effettuato mese per mese rispettivamente utilizzando le equazioni 1.1 e 1.2.<br>Al fine di individuare la compresenza di riscaldamento e raffrescamento nello stesso mese si calcolano 12 mesi in modalità di riscaldamento e 12 mesi in modalità di raffrescamento. | La durata della stagione di riscaldamento e raffrescamento viene determinata applicando le equazioni da 1.27 e 1.34. Qualora $\theta_{air,0}$ (ottenuta applicando il passo 1) è < 20°C → $\Phi_{H,nd} > 0$; qualora $\theta_{air,0} > 26$°C → $\Phi_{C,nd} > 0$. | È possibile selezionare un periodo prefissato di riscaldamento/ raffrescamento o indicare diverse tipologie di regolazione:<br>- non controllata (*Uncontrolled*)<br>- *Set-point* per riscaldamento (*Single heating Setpoint*)<br>- *Set-point* per raffrescamento (*Single cooling Setpoint*)<br>- *Set-point* per riscaldamento e raffrescamento (*Single heating/cooling setpoint*)<br>- *Set-point* per riscaldamento e raffrescamento con banda morta (*Dual setpoint with deadband*)<br>Ciascuna tipologia di regolazione della temperature interna (tranne la tipologia *Uncontrolled*) attiva il sistema di riscaldamento/raffrescamento solo se la temperatura interna è inferiore/superiore rispetto al valore inserito. |
| **Opzioni per la congruenza dei modelli**<br>Il calcolo del fabbisogno di energia termica secondo il metodo medio mensile è stato effettuato mese per mese sia attraverso l'equazione 1.1 con temperatura di *set-point* pari a 20°C, sia attraverso l'equazione 1.2 con temperatura di *set-point* pari a 26°C.<br>Il calcolo del fabbisogno di energia termica secondo il metodo orario semplificato è stato effettuato secondo le equazioni dalla 1.27 alla 1.34. Sono state quindi sommate le ore in cui è richiesta energia termica per riscaldare determinando il periodo di riscaldamento e le ore in cui è richiesta energia termica per raffrescare determinando il periodo di raffrescamento.<br>Il calcolo del fabbisogno di energia termica attraverso *EnergyPlus* è stato effettuato impostando quale sistema di regolazione della temperatura interna un *set-point* per riscaldamento (20°C) e raffrescamento (26°C) con banda morta. Il periodo di riscaldamento è pertanto la somma delle ore in cui è richiesta energia termica per riscaldare mentre il periodo di raffrescamento è la somma delle ore in cui è richiesta energia termica per raffrescare. | | |

| UNI EN ISO 13790 – metodo mensile quasi stazionario | UNI EN ISO 13790 – metodo orario semplificato | Energy Plus – metodo dinamico |
|---|---|---|
| **6. Scambio termico per trasmissione attraverso l'involucro opaco** | | |
| **6.1 Scambio termico per trasmissione verso l'ambiente esterno** | | |
| Lo scambio termico per trasmissione viene calcolato secondo l'equazione 1.5 includendo pertanto nel calcolo lo scambio termico dovuto all'extraflusso verso la volta celeste.<br>Il coefficiente di scambio termico verso l'ambiente esterno è pari a<br>$H_D = \left[\sum_i A_i U_i + \sum_k l_k \psi_k + \sum_j \chi_j\right]$ (1.42) | Lo scambio termico per trasmissione viene calcolato secondo l'equazione 1.3 escludendo pertanto dal calcolo lo scambio termico dovuto all'extraflusso verso la volta celeste.<br>Si considerano i coefficienti di accoppiamento termico come riportati nel paragrafo 1.2.2 | Lo scambio termico per trasmissione può essere calcolato:<br>- secondo il metodo alle differenze finite o alle funzioni di trasferimento per la parte conduttiva. Entrambe le metodologie di calcolo non tengono in considerazione i flussi termici bi-tridimensionali;<br>- in maniera semplificata (applicando il concetto di temperatura sole-aria) o dettagliata per la parte convettiva e radiativa. Con il metodo dettagliato vengono calcolate separatamente le componenti radiative alle alte e basse lunghezze d'onda (in funzione della località,delle superfici adiacenti, dell'inclinazione della superficie, delle sue proprietà, ecc.) e convettive (in funzione dell'indice di rugosità della superficie, delle condizioni atmosferiche ecc.) |

**Opzioni per la congruenza dei modelli**

Al fine del calcolo del coefficiente di scambio termico per trasmissione non vengono considerati flussi termici bi - tridimensionali, in quanto *EnergyPlus* non ne permette il calcolo. Si trascurano pertanto eventuali ponti termici lineari e puntuali ovvero si trascurano i coefficienti di trasmissione lineare ($\psi$) e puntuale ($\chi$) nell'equazione 1.42.

Il calcolo dello scambio termico per conduzione attraverso l'involucro opaco viene effettuato con *EnergyPlus* secondo il metodo delle funzioni di trasferimento. Il calcolo dello scambio termico per trasmissione attraverso metodologia semplificata avviene secondo la UNI EN ISO 6946.

I coefficienti di scambio termico liminare da utilizzare all'interno delle metodologie di calcolo semplificate (sia per il calcolo medio mensile che per il calcolo orario semplificato) sono stati ricavati a partire dai valori dettagliati calcolati attraverso *EnergyPlus*.

In particolare, sono stati ricavati attraverso *EnergyPlus* i valori medi mensili dei coefficienti radiativi (rispettivamente verso l'aria $h_{air}$, il terreno $h_{gr}$ e la volta celeste $h_{sk}$) e convettivi $h_{ve}$ calcolati secondo il metodo dettagliato. È stato pertanto ricavato un coefficiente di scambio termico liminare esterno medio mensile pari a

$$h_e = h_{air} + h_{gr} + h_{sk} + h_{ve} \quad (1.43)$$

I valori di trasmittanza termica ($U_i$) contenuti nell'equazione 1.42 sono stati ricavati utilizzando tali valori di coefficienti di scambio termico liminare.

| UNI EN ISO 13790 – metodo mensile quasi stazionario | UNI EN ISO 13790 – metodo orario semplificato | Energy Plus – metodo dinamico |
|---|---|---|

Al fine di calcolare lo scambio termico per irraggiamento verso la volta celeste attraverso metodologia semplificata, si è utilizzata l'equazione seguente secondo UNI EN ISO 13790

$$\Phi_r = R_{se} \cdot U_c \cdot A_c \cdot h_r \cdot \Delta\theta_{er} \qquad (1.44)$$

dove

$R_{se}$ è la resistenza liminare su lato esterno;
$U_c$ è la trasmittanza termica dell'elemento di involucro opaco;
$A_c$ è la superficie dell'elemento di involucro;

$h_r$ è il coefficiente di scambio termico radiativo;
$\Delta\theta_{er}$ è la differenza tra la temperatura della volta celeste e dell'aria esterna.
In particolare:
$R_{se}$ è stato calcolato come $1/h_e$ dove $h_e$ è calcolato secondo l'equazione 1.43;
$U_c$ è stato calcolato considerando il coefficiente di scambio liminare esterno (equazione 1.43);
$h_i$ (coefficiente di scambio termico liminare interno) è stato calcolato secondo la UNI EN ISO 6946;
$h_r$ è stato ricavato attraverso *EnergyPlus* ed è pari a $h_{sk}$ dove $h_{sk}$ è il coefficiente di scambio termico radiativo ricavato da *EnergyPlus* che tiene conto del fattore di forma tra il componente e la volta celeste, $F_{r,k}$. Pertanto $F_{r,k}$ non viene considerato nell'equazione 1.5 per quanto riguarda il metodo mensile e nell'equazione 1.8 per quanto riguarda il metodo orario.
$\Delta\theta_{er}$ è stato calcolato come output attraverso *EnergyPlus.* In particolare si è ricavato un valore medio mensile di $\Delta\theta_{er}$.

## 6.2 Scambio termico per trasmissione per componenti a contatto con il terreno

Il coefficiente di scambio termico per componenti a contatto con il terreno è dato da

$$H_g = \left[\sum_i A_i U_{eq} + \sum_k l_k \psi_k + \sum_j \chi_j\right] \qquad (1.45)$$

dove
$U_{eq}$ è la trasmittanza termica equivalente secondo la UNI EN ISO 13370

Lo scambio termico attraverso elementi a contatto con il terreno viene calcolato nota la temperatura superficiale del terreno.

| UNI EN ISO 13790 – metodo mensile quasi stazionario | UNI EN ISO 13790 – metodo orario semplificato | Energy Plus – metodo dinamico |
|---|---|---|
| Il coefficiente di scambio termico $H_g$ viene pertanto moltiplicato per la differenza di temperatura secondo l'equazione 1.3.<br>Nell'equazione 1.3, la temperatura $\theta_e$ considerata per il calcolo dell'energia trasmessa è pari alla temperatura dell'ambiente esterno. | | |
| **Opzioni per la congruenza dei modelli**<br>All'interno di *EnergyPlus* è stato modellato un componente a contatto con il terreno di trasmittanza pari alla trasmittanza termica equivalente ($U_{eq}$) calcolata secondo la UNI EN ISO 13370 ed è stata associata al terreno una temperatura media mensile pari alla temperatura media mensile dell'aria esterna. | | |
| **7. Scambio termico per trasmissione attraverso l'involucro trasparente** | | |
| **7.1 Trasmittanza termica di componenti vetrati** | | |
| La trasmittanza termica del serramento è calcolata secondo l'equazione<br>$$U_w = \frac{U_g A_g + U_F A_F + \psi_g l}{A_g + A_F} \quad (1.46)$$<br>dove<br>$U_g$ è la trasmittanza del vetro<br>$A_g$ è la superficie del vetro<br>$U_F$ è la trasmittanza del telaio<br>$A_F$ è la superficie del telaio<br>$\psi_g$ è la trasmittanza termica lineare del distanziatore<br>$l$ è il perimetro dei vetri | | Lo scambio termico per trasmissione attraverso i componenti di involucro vetrato viene calcolato risolvendo le equazioni di bilancio termico su ogni superficie vetrata per ogni *step* di calcolo.<br>Le ipotesi di calcolo sono le seguenti:<br>- il vetro è abbastanza sottile che l'accumulo termico è trascurabile;<br>- il flusso termico è monodimensionale<br>Al fine di considerare eventuali zone interessate da scambi termici multidimensionali in corrispondenza del distanziatore ($\psi_g$) vengono introdotti coefficienti adimensionali pari al rapporto tra le aree interessate da flussi termici bidimensionali e monodimensionali.<br>Per quanto riguarda i coefficienti di scambio termico liminare, al pari dei componenti di involucro opaco, possono essere calcolati con metodo semplificato o dettagliato. |
| **Opzioni per la congruenza dei modelli**<br>Il calcolo della trasmittanza termica del serramento è stato effettuato escludendo la trasmittanza termica lineare $\psi_g$ dall'equazione 1.46 e considerando altresì nulli i flussi | | |

| UNI EN ISO 13790 – metodo mensile quasi stazionario | UNI EN ISO 13790 – metodo orario semplificato | Energy Plus – metodo dinamico |
|---|---|---|
| termici bidimensionali in *EnergyPlus*.<br>Al pari del punto 6.1, sono stati calcolati i coefficienti liminari esterni a partire dai coefficienti di scambio termico radiativi e convettivo (ricavati da *EnergyPlus*) secondo l'equazione 1.43 e sono stati inseriti all'interno dell'equazione 1.46. Per quanto riguarda il coefficiente liminare interno, si è mantenuto il valore secondo quanto proposto dalla norma UNI EN ISO 10077-1, Allegato A. | | |
| **7.2 Chiusure oscuranti** | | |
| La trasmittanza termica dei componenti di involucro trasparente media per tener conto dell'utilizzo di chiusure oscuranti viene calcolata secondo l'equazione seguente in accordo con la UNI EN ISO 13790<br>$U_{\mathrm{w,corr}} = U_{\mathrm{w+shut}} \cdot f_{\mathrm{shut}} + U_{\mathrm{w}} \cdot (1 - f_{\mathrm{shut}})$ (1.47)<br>con<br>$U_{\mathrm{w+shut}} = \frac{1}{1/U_{\mathrm{w}} + \Delta R}$ (1.48)<br>dove<br>$\Delta R$ è la resistenza termica aggiuntiva delle chiusure oscuranti fornito dalla UNI EN ISO 10077-1<br>e con<br>$f_{\mathrm{sh}} = \frac{\sum (\theta_{\mathrm{I,set,HC}} - \theta_{\mathrm{e}})_{\mathrm{sh}}}{\sum (\theta_{\mathrm{I,set,HC}} - \theta_{\mathrm{e}})_{\mathrm{tot}}}$<br>(1.49)<br>ovvero la differenza cumulata di temperatura tra interno ($\theta_{\mathrm{I,set,HC}}$) ed esterno ($\theta_{\mathrm{e}}$) in presenza di chiusure oscuranti (numeratore) ed in assenza di | La trasmittanza termica dei componenti di involucro trasparente viene calcolata secondo l'equazione 1.46, nelle ore di assenza di chiusure oscuranti e secondo l'equazione 1.48 per le ore con presenza di chiusure oscuranti | Le chiusure/schermature condizionano le proprietà termiche del vetro e il coefficiente di assorbimento termico alle alte e alle basse lunghezze d'onda in funzione della tipologia, della sua trasmittanza solare totale e del numero di inter-riflessioni tra il sistema di schermatura e il vetro.<br>A differenza delle metodologie di calcolo semplificate, dove la distinzione tra schermatura solare e chiusura oscurante è netta (la prima influenza le proprietà solari del vetro, la seconda influenza la sua resistenza termica), *EnergyPlus* considera diverse tipologie di dispositivi che modificano contemporaneamente sia gli apporti solari che la resistenza termica.<br>I sistemi di chiusura/schermatura sono:<br>- sistemi schermanti *shades* posizionati all'interno, in intercapedine o all'esterno;<br>- veneziane *blinds*;<br>- griglie di protezione *screens*.<br>Le modalità di gestione sono diverse e ne permettono la regolazione per motivi di comfort termico e visivo. |

| UNI EN ISO 13790 – metodo mensile quasi stazionario | UNI EN ISO 13790 – metodo orario semplificato | Energy Plus – metodo dinamico |
|---|---|---|
| chiusure oscuranti (denominatore). | | |

**Opzioni per la congruenza dei modelli**

In caso di presenza di chiusure oscuranti, la trasmittanza del serramento è stata calcolata attraverso l'equazione 1.47 per il metodo mensile; considerando la trasmittanza $U_w$ nelle ore di assenza di chiusure oscuranti e $U_{W+shut}$ in presenza di chiusure oscuranti per il metodo orario semplificato. In *EnergyPlus* sono state modellate come "*shades*" e regolate attraverso la modalità di gestione "*On night if low outdoor temperature and off day*" che permette la completa attivazione della chiusura solo in assenza di radiazione solare e qualora la temperatura esterna sia minore di 10°C.

Anche secondo i metodi semplificati si considerano attive le chiusure oscuranti quando non è presente radiazione solare e quando la temperatura esterna è minore di 10°C.

Al fine di considerare tale sistema di gestione delle chiusure oscuranti all'interno del calcolo medio mensile, viene calcolato il fattore $f_{sh}$ secondo l'equazione 1.49 attraverso i valori forniti da *EnergyPlus.*

## 8 Dispersioni per ventilazione

Lo scambio termico per ventilazione viene calcolato secondo la 1.4 dove

$$H_{ve,adj} = \rho_a \cdot c_a \left( \sum_k b_{ve,k} \cdot q_{ve,k,mn} \right) \qquad (1.50)$$

con

$\rho_a \cdot c_a$ 1200 J/(m$^3$K)

$b_{ve,k}$ fattore di correzione per il flusso d'aria

$q_{ve,k,mn}$ portata d'aria del flusso d'aria *k*-esimo pari a

$$q_{ve,k,mn} = f_{ve,t,k} \cdot q_{ve,k} \qquad (1.51)$$

con

$f_{ve,t,k}$ frazione di tempo in cui si verifica il flusso d'aria *k*-esimo

$q_{ve,k}$ portata d'aria mediata sul tempo del flusso *k*-esimo pari a

$$q_{ve,k} = \frac{n \cdot V_{netto}}{3600} \ [\mathrm{m^3/s}] \qquad (1.52)$$

Lo scambio termico per ventilazione viene incluso all'interno dell'equazione 1.39

Ci sono diverse modalità di calcolo per la ventilazione/infiltrazione:

- portata di infiltrazione di progetto "*infiltration design flow rate*"
- infiltrazione attraverso un'area di dispersione effettiva "*infiltration by effective leakage area*"
- infiltrazione attraverso un coefficiente di flusso "*infiltration by flow coefficient*"
- ventilazione "*zone ventilation*"

In ogni caso le proprietà dell'aria ($\rho_a \cdot c_a$) in ingresso variano al variare della temperatura.

| UNI EN ISO 13790 – metodo mensile quasi stazionario | UNI EN ISO 13790 – metodo orario semplificato | Energy Plus – metodo dinamico |
|---|---|---|
| dove $n$ sono i ricambi orari [$h^{-1}$] e $V_{netto}$ è il volume netto della zona termica. | | |
| **Opzioni per la congruenza dei modelli**<br>Si considera ventilazione naturale. Il tasso di ricambio orario considerato nell'equazione 1.52 è pari a 0,3 $h^{-1}$.<br>All'interno dell'equazione 1.50 è stato inserito un valore medio mensile di $\rho_a \cdot c_a$ ricavato da *EnergyPlus* attraverso la seguente equazione<br>$\rho_a \cdot c_a = \frac{\Phi_{ve}}{\dot{V} \cdot \Delta\theta}$<br>(1.53)<br><br>dove<br>$\Phi_{ve}$ è il flusso termico disperso per ventilazione ricavato attraverso *EnergyPlus* [W] per il periodo di calcolo considerato;<br>$\dot{V}$ è la portata d'aria di ventilazione [$m^3/s$];<br>$\Delta\theta$ è la differenza tra temperatura interna ed esterna.<br>Le dispersioni per ventilazione sono state calcolate in *EnergyPlus* attraverso la modalità "*infiltration: design flow rate*" considerando come portata di progetto un valore costante pari a $0{,}3 \cdot V_{netto}$ dell'ambiente climatizzato.<br>Non sono stati considerati ricambi d'aria tra ambiente climatizzato e ambiente non climatizzato né tra ambiente non climatizzato ed esterno. | | |
| **9. Apporti interni** | | |
| Gli apporti termici interni sono calcolati attraverso l'equazione 1.6 dove $\Phi_{int}$ comprendono in generale i flussi termici sensibili prodotti:<br>dagli occupanti<br>dalle apparecchiature<br>dall'impianto d'illuminazione<br>dall'acqua calda | Gli apporti termici comprendono gli stessi termini considerate per il calcolo medio mensile con la differenza che i valori possono variare ora per ora. | Attraverso *EnergyPlus* è possibile modellare i carichi termici in funzione della tipologia (persone, illuminazione, apparecchiatura elettrica, acqua calda ecc.) ed è altresì possibile specificare la quota di scambio termico radiativa e convettiva. La quota convettiva è una componente del bilancio sull'aria (equazione 1.39) mentre la quota radiativa è una componente dell'equazione di bilancio sulla superficie interna dei componenti di involucro opaco e trasparenti. |
| | | |

<table>
<tr><th>UNI EN ISO 13790 – metodo mensile quasi stazionario</th><th>UNI EN ISO 13790 – metodo orario semplificato</th><th>Energy Plus – metodo dinamico</th></tr>
<tr><td colspan="3">Opzioni per la congruenza dei modelli<br>Gli apporti interni $\Phi_{int}$ sono stati individuati attraverso quanto indicato per edifici con destinazione d'uso residenziale dalla UNI/TS 11300-1 in funzione della superficie netta di pavimento, che pertanto non tengono in considerazione flussi termici prodotti dagli impianti di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione:<br>Se $A_f < 170$ m$^2$ $\Phi_{int} = 5{,}294 \cdot A_f - 0{,}01557 \cdot A_f^2$ (1.54)<br>Se $A_f > 170$ m$^2$ $\Phi_{int} = 450$ W (1.55)<br>Non sono stati considerati apporti interni in locali non climatizzati.<br>Attraverso EnergyPlus gli apporti interni sono stati inseriti come "Other equipment" in valore costante pari a quanto calcolato attraverso le equazioni sopra riportate. Al fine di rispettare quanto prescritto dalla UNI EN ISO 13790, Appendice G, si sono considerati gli scambi termici sensibili per un 50% radiativi e per un 50% convettivi.</td></tr>
<tr><td colspan="3">10. Apporti solari</td></tr>
<tr><td>Gli apporti solari sono calcolati attraverso l'equazione 1.7 dove $\Phi_{sol}$ è calcolato attraverso la 1.9</td><td>I flussi termici solari $\Phi_{sol}$ sono calcolati ora per ora secondo l'equazione 1.8.</td><td rowspan="2">Il flusso termico solare è una componente del bilancio sulla superficie sia esterna che interna dei componenti di involucro. Il flusso termico solare trasmesso all'interno attraverso i componenti finestrati viene distribuito all'interno delle superfici di involucro secondo diverse modalità:<br>- minimal shadowing<br>- full exterior<br>- full interior and exterior<br>- full exterior with reflexion<br>- full interior and exterior with reflexion</td></tr>
<tr><td colspan="2">$F_{sh,ob,k}$ è il fattore di ombreggiatura calcolato secondo l'equazione seguente<br>$$F_{sh,ob,k} = F_{hor} + F_{ov} + F_{fin} \quad (1.56)$$<br>con<br>$F_{hor}$ fattore di ombreggiatura per ostacoli esterni<br>$F_{ov}$ fattore di ombreggiatura per aggetti orizzontali<br>$F_{fin}$ fattore di ombreggiatura per aggetti verticali<br><br>e dove $A_{sol}$ è l'area di captazione efficace dell'involucro opaco ($A_{sol,\,op}$) e vetrato ($A_{sol,gl}$)<br>$$A_{sol} = A_{sol,gl} + A_{sol,op} \quad (1.57)$$</td></tr>
</table>

| UNI EN ISO 13790 – metodo mensile quasi stazionario | UNI EN ISO 13790 – metodo orario semplificato | Energy Plus – metodo dinamico |
|---|---|---|
| **10.1 Area di captazione solare effettiva dei componenti vetrati** | | |
| L'area di captazione solare effettiva dei componenti vetrati è calcolata secondo la seguente equazione<br>$A_{sol,gl} = F_{sh,gl} \cdot g_{gl} \cdot (1 - F_F) \cdot A_{w,p}$ (1.58)<br>dove<br>$g_{gl}$ è la trasmittanza solare del vetro<br>$F_F$ è il fattore telaio del serramento<br>$A_{w,p}$ è l'area totale del serramento<br>$F_{sh,gl}$ è il fattore di riduzione per ombreggiatura relativo a dispositivi di schermatura mobili<br><br>La trasmittanza solare del vetro $g_{gl}$ si ottiene attraverso l'equazione seguente<br>$g_{gl} = g_{gl,n} \cdot F_w$ (1.59)<br>dove $g_{gl,n}$ è la trasmittanza solare per radiazione solare normale e $F_w$ è un fattore di correzione. | | Le caratteristiche solari del vetro possono essere considerate in due modalità: semplificata e dettagliata. Con il metodo dettagliato è possibile inserire diverse caratteristiche del vetro (coefficiente di trasmissione $\tau$, riflessione $\rho$, assorbimento $\alpha$) su entrambi i lati al variare della lunghezza d'onda; con il metodo semplificato è possibile considerare una media delle stesse per la lunghezza d'onda del solare, visibile e infrarosso.<br>Secondo il metodo semplificato, è possibile introdurre valori di $\tau$ e $\rho$ per incidenza di radiazione solare normale rispetto al vetro. L'algoritmo di calcolo permette di ottenere quindi valori orari relativi a tali caratteristiche al variare dell'angolo di incidenza tra radiazione solare e superficie vetrata. |
| **10.2 Schermature solari** | | |
| Il fattore di riduzione degli apporti solari relative a schermature mobile è calcolato secondo la seguente equazione<br>$F_{sh,gl} = \frac{(1 - f_{sh,with}) \cdot g_{gl} + f_{sh,with} \cdot g_{gl+shut}}{g_{gl}}$ (1.60) | Al fine di considerare la presenza di schermature solari, si valuta, ora per ora, se la trasmittanza solare è da calcolarsi in presenza ($g_{gl+sh}$) o in assenza di schermature solari ($g_{gl}$). | Per quanto riguarda i possibili sistemi di schermatura sono gli stessi elencati al punto 7.2.<br>La radiazione solare assorbita da eventuali sistemi di schermatura partecipa al bilancio termico sulla superficie del componente vetrato. |

| UNI EN ISO 13790 – metodo mensile quasi stazionario | UNI EN ISO 13790 – metodo orario semplificato | Energy Plus – metodo dinamico |
|---|---|---|
| con<br>$f_{sh,with}$ è la frazione pesata del tempo in cui la schermatura solare è utilizzata. I valori sono fissati a livello nazionale; esempi sono forniti all'interno dell'appendice G della UNI EN ISO 13790;<br>$g_{gl+shut}$ è la trasmittanza energetica solare totale della finestra, quando la schermatura solare è utilizzata calcolata in accordo con la UNI EN ISO 13363-1. | | |

**Opzioni per la congruenza dei modelli**

L'equazione 1.58 è stata considerata per entrambi i metodi orario semplificato e medio mensile.

Qualora presenti, le schermature solari sono state considerate completamente chiuse quando $I_{sol,tot}$ > 300 W/m$^2$ e completamente aperte quando $I_{sol,\,tot}$< 300 W/m$^2$.

Il calcolo di $g_{gl+sh}$ è stato effettuato per ogni ora secondo la UNI EN ISO 13363-1 per schermature solari esterne.

$$g_{\mathrm{gl+sh}} = \tau_{\mathrm{e,B}} \cdot g_{\mathrm{gl}} + \alpha_{\mathrm{e,B}} \cdot \frac{G}{G_2} + \tau_{\mathrm{e,B}} \cdot \left(1 - g_{\mathrm{gl}}\right) \cdot \frac{G}{G_1} \qquad (1.61)$$

con

$\tau_{e,B}$ coefficiente di trasmissione solare della schermatura solare

$\alpha_{e,B}$ coefficiente di assorbimento solare della schermatura dato da

$$\alpha_{\mathrm{e,B}} = 1 - \tau_{\mathrm{e,B}} - \rho_{\mathrm{e,B}} \qquad (1.62)$$

$G_1$ 6 W/(m$^2$K)

$G_2$ 18 W/(m$^2$K)

$$G = \left( \frac{1}{U_{\mathrm{g}}} + \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \right)^{-1} \qquad (1.63)$$

Il risultato medio mensile ottenuto attraverso una media dei valori orari di $g_{gl+sh}$ pesati sull'energia solare oraria incidente sul vetro è stato utilizzato per il calcolo medio mensile quasi stazionario.

Il calcolo di $g_{gl}$ per il metodo orario viene effettuato a partire dal valore di $g_{gl,n}$ fornito come *output* da *EnergyPlus* moltiplicato per un coefficiente $F_w$ orario e pari a

| UNI EN ISO 13790 – metodo mensile quasi stazionario | UNI EN ISO 13790 – metodo orario semplificato | Energy Plus – metodo dinamico |
|---|---|---|

$$F_w = \frac{\tau_{hourly}}{\tau_{normal}} \quad (1.64)$$

dove $\tau_{hourly}$ è il coefficiente di trasmissione solare del vetro variabile ora per ora e calcolato da *EnergyPlus* e $\tau_{normal}$ è lo stesso per radiazione normale fornito quale input.
Il dato di $F_w$ medio e variabile mensilmente viene inserito all'interno del calcolo medio mensile quasi-stazionario.
Al fine di considerare le ore di attivazione delle schermature solari è stato effettuato il seguente calcolo

$$f_{sh,with} = \frac{\sum_{\tau / I_{sol} > 300 W/m^2} I_{sol}}{\sum I_{sol,tot}} \quad (1.65)$$

dove al denominatore vengono sommati i valori orari dell'irradianza solare quando questa è maggiore di 300 W/m$^2$ e al denominatore vengono sommati i valori orari di irradianza solare dell'intero periodo di calcolo considerato.
Secondo il metodo orario semplificato invece si calcola l'equazione 1.58 per ogni ora considerando $g_{gl}$ in assenza durante le ore in assenza di schermatura solare e $g_{gl+sh}$ in presenza di schermatura solare.
In *EnergyPlus* le caratteristiche del vetro sono state calcolate con il metodo semplificato ed è stata considerata quale schermatura solare la tipologia "*blind*", controllata attraverso la modalità di gestione "*On if high solar on window*" con *Setpoint*=300 W/m$^2$.

## 10.2 Area di captazione solare effettiva dei componenti opachi

L'area di captazione solare effettiva dei componenti opachi è calcolata secondo la seguente equazione

$$A_{sol,op} = \alpha_{sol,c} \cdot R_{se} \cdot U_c \cdot A_c \quad (1.66)$$

dove
$\alpha_{sol,c}$ è il coefficiente di assorbimento solare dell'elemento c
$R_{se}$ è la resistenza liminare esterna
$U_c$ è la trasmittanza termica dell'elemento *c*
$A_c$ è la superficie dell'elemento c

Si veda quanto riportato ai punti 6.1 e 10.

**Opzioni per la congruenza dei modelli**
Al pari del punto 6.1, i coefficienti liminari sono stati ricavati attraverso *EnergyPlus* e utilizzati per il calcolo di $R_{se}$ e di $U_c$.

| UNI EN ISO 13790 – metodo mensile quasi stazionario | UNI EN ISO 13790 – metodo orario semplificato | Energy Plus – metodo dinamico |
|---|---|---|
| **10.3 Fattori di ombreggiatura** | | |
| I fattori di ombreggiatura per ostacoli esterni,($F_{hor}$), per aggetti orizzontali ($F_{ov}$) e per aggetti verticali ($F_{fin}$) possono essere ricavati attraverso valori tabellati in funzione dell'angolo di imbreggiatura, della latitudine e dell'orientamento. | Il fattore di ombreggiatura per ostacoli esterni può essere calcolato come<br>$F_{hor} = 1 - \left( I_{dir} / I_{sol,k} \right)$ se $S_h$ $< \beta$ (1.67)<br>$F_{hor} = 1$ se $S_h \geq \beta$ (1.68)<br><br>dove<br>$S_h$ è l'altezza solare [°]<br>$\beta$ è l'angolo di ombreggiatura per ostacoli esterni[°]<br>$I_{dir}$ è l'irradianza solare diretta [W/m$^2$]<br>$I_{tot}$ è l'irradianza solare totale [W/m$^2$]<br>Il fattore di ombreggiatura per aggetti orizzontali può essere calcolato come<br>$F_{ov,dir} = \max(0;1-(0,5 \cdot \tan\delta / \tan(90 - S_h)))$ (1.69)<br>$F_{ov,dif} = 1 - (\delta / (\pi / 2))$ (1.70)<br><br>$F_{ov} = \dfrac{F_{ov,dir} \cdot R_{dir} + F_{ov,dif} \cdot R_{dif} + 1 - R_{tot}}{R_{tot}}$ (1.71)<br><br>dove<br>$\delta$ è l'angolo di ombreggiatura per aggetti orizzontali<br>$R_{dir}$ è la frazione di radiazione solare diretta rispetto | È possibile conoscere la frazione di area soleggiata e ombreggiata ora per ora per ogni componente edilizio esposto in ambiente esterno conoscendo la posizione del sole ora per ora rispetto ad una superficie comunque orientata.<br>Il calcolo degli ombreggiamenti può essere più o meno sofisticato a seconda delle metodologie che si adottano. Le possibili metodologie sono individuate all'interno del punto 10. |

| UNI EN ISO 13790 – metodo mensile quasi stazionario | UNI EN ISO 13790 – metodo orario semplificato | Energy Plus – metodo dinamico |
|---|---|---|
| | alla radiazione totale<br>$R_{dir} = \frac{I_{dir}}{I_{tot}}$ (1.72)<br>$R_{dif}$ è la frazione di radiazione solare diffusa<br>$R_{dif} = \frac{I_{dif}}{I_{tot}}$ (1.73)<br>$R_{tot} = R_{dir} + R_{dif}$ (1.74) | |
| **Opzioni per la congruenza dei modelli**<br>Gli angoli di ombreggiatura per il metodo orario semplificato sono stati calcolati a partire dai dati elaborati da *EnergyPlus* ora per ora.<br>In particolare sono stati ricavati fattori di ombreggiatura totali per ogni elemento vetrato attraverso la seguente equazione<br>$F_{sh,ob} = \frac{I_{tot,ob}}{I_{tot}}$ (1.75) | | |
| dove<br>$I_{tot,ob}$ è l'irradianza solare incidente su un elemento di involucro in presenza di ostruzioni ombreggianti [W/m$^2$]<br>$I_{tot}$ è l'irradianza solare incidente sullo stesso elemento di involucro in assenza di ostruzioni ombreggianti [W/m$^2$]<br>A partire dai dati di $F_{ob}$ orari sono stati calcolati gli stessi medi mensili. | | |
| **11. Parametri termici dinamici** | | |
| Il comportamento dinamico dell'edificio è preso in considerazione attraverso l'introduzione di fattori di utilizzazione.<br>Il fattore di utilizzazione degli apporti è ricavato attraverso le equazioni 1.10, 1.11, 1.12 dove la costante di tempo dell'edificio è calcolata come | Il comportamento dinamico dell'edificio viene preso in considerazione attraverso l'introduzione del nodo relativo alla massa a temperatura $\theta_m$.<br>La massa efficace dell'edificio è data dall'equazione<br>$A_m = \frac{C_m^{\ 2}}{\left(\sum A_j \cdot \kappa_j^{\ 2}\right)}$ (1.78) | Il comportamento dinamico viene calcolato in maniera dettagliata per ogni componente di involucro opaco dell'edificio considerando i meccanismi di accumulo termico. |

| UNI EN ISO 13790 – metodo mensile quasi stazionario | UNI EN ISO 13790 – metodo orario semplificato | Energy Plus – metodo dinamico |
|---|---|---|
| $\tau = \frac{C_m / 3600}{H_{tr,adj} + H_{ve,adj}}$ (1.76)<br>con<br>$C_m = \sum \kappa_j \cdot A_j$ (1.77)<br><br>dove $\kappa_j$ è la capacità termica areica interna del *j*-esimo componente della struttura edilizia; $A_j$ è la superficie interna del *j*-esimo componente della struttura edilizia.<br><br>Lo stesso per il calcolo del fattore di utilizzazione delle dispersioni (equazioni 1.15, 1.16, 1.17) | dove $C_m$ è calcolato secondo la 1.77.<br><br>Si considera che elementi quali porte e finestre siano privi di massa e pertanto esclusi dai calcoli della massa efficace dell'edificio. | |

**Opzioni per la congruenza dei modelli**
Si considerano per tutte le metodologie di calcolo le aree $A_i$ corrispondenti a tutti gli elementi di involucro rivolti verso l'ambiente climatizzato, pareti interne comprese (tramezzi verticali e solai interpiano). Le porte vengono escluse dalle aree $A_j$ per calcolo orario semplificato mentre vengono incluse per il calcolo medio mensile e dinamico.

## 1.4 Analisi di un caso di studio

Il caso di studio analizzato consiste in una palazzina a destinazione d'uso residenziale con superficie di pavimento pari a 451 $m^2$ suddivisa in tre piani fuori terra climatizzati. Il vano scala e il sottotetto non sono climatizzati.

L'intero edificio è stato considerato come una sola zona termica climatizzata per il periodo di riscaldamento alla temperatura di 20°C e per il periodo di raffrescamento a 26°C.

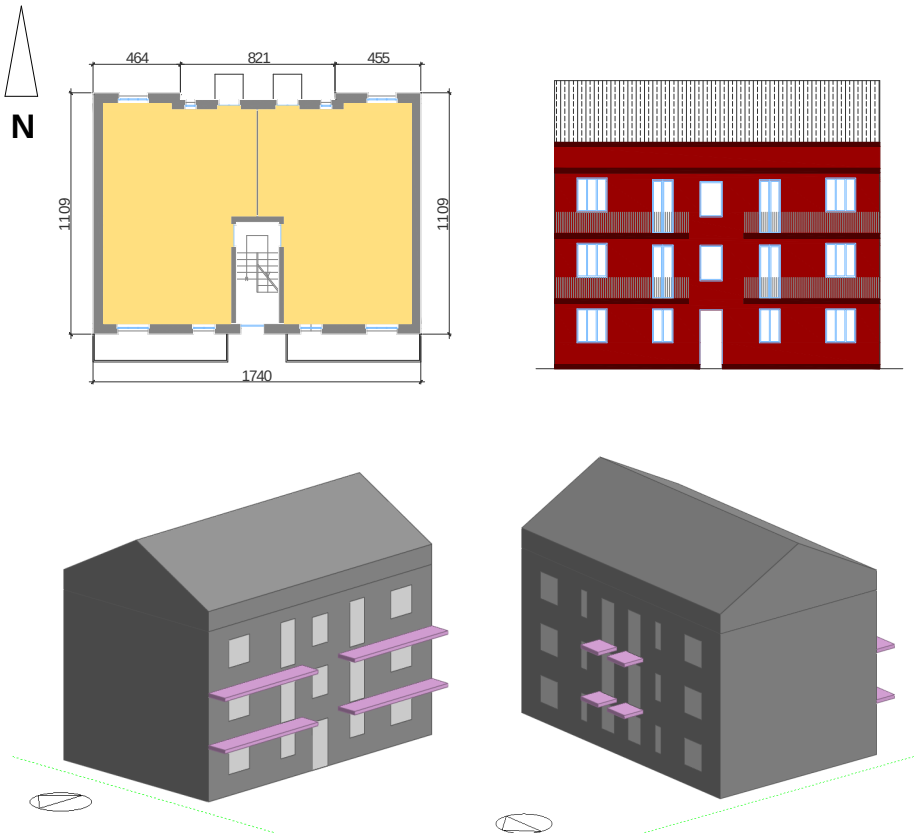



Figura 1.8. Caso di studio: pianta di un piano tipo, prospetto sud e modelli 3D.

Al fine di confrontare il comportamento dell'edificio per diverse località climatiche, lo stesso caso di studio è stato analizzato per il clima di Torino e di Istanbul. Si riportano nelle tabelle seguente i dati geografici e i dati climatici medi mensili riferiti alle due località considerate per i calcoli.

Tabella 1.1 Dati geografici delle località di Torino e Istanbul

| | | Torino | Istanbul |
|---|---|---|---|
| Longitudine | [°] | 45,08 | 41,4 |
| Latitudine | [°] | 7,68 | 29 |
| Altitudine s.l.m. | [m] | 239 | 25 |

Tabella 1.2 Valori medi mensili della temperature nelle località di Torino e Istanbul

| | Temperatura media mensile ($\theta_e$) [°C] | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **gen** | **feb** | **mar** | **apr** | **mag** | **giu** | **lug** | **ago** | **set** | **ott** | **nov** | **dic** |
| Torino | -0,2 | 1,5 | 7,0 | 10,7 | 15,5 | 19,1 | 21,7 | 20,4 | 17,0 | 11,6 | 5,7 | 1,4 |
| Istanbul | 5,8 | 4,9 | 7,3 | 12,2 | 16,8 | 21,6 | 24,1 | 24,2 | 20,8 | 16,5 | 11,4 | 7,9 |

Tabella 1.3 Irradianza media mensile delle località di Torino e Istanbul

| | Irradianza solare totale media mensile su piano orizzontale (I) [W/m$^2$] | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **gen** | **feb** | **mar** | **apr** | **mag** | **giu** | **lug** | **ago** | **set** | **ott** | **nov** | **dic** |
| Torino | 34 | 63 | 117 | 164 | 199 | 223 | 226 | 189 | 131 | 76 | 45 | 34 |
| Istanbul | 60 | 78 | 116 | 167 | 214 | 250 | 250 | 219 | 175 | 110 | 689 | 48 |

L'involucro opaco presenta una superficie di colore medio ($\alpha$ = 0,6) ed è costituito da pareti in laterizio con isolamento a cappotto caratterizzato da una trasmittanza termica $U$ di 0,3 W/(m$^2$K) circa; l'involucro vetrato è costituito da un sistema vetrato (triplo vetro basso emissivo con intercapedine in Argon di spessore 3 – 6 - 3 -6 – 3 [mm]) con trasmittanza $U_g$ pari a 1,34 W/(m$^2$K) e da un telaio con trasmittanza $U_F$ di circa 2,3 W/(m$^2$K). La trasmittanza solare totale per incidenza normale dei vetri $g_{gl,n}$ è 0,688 [-]. Non si considerano né chiusure oscuranti né schermature solari.

Le stratigrafie degli elementi di involucro disperdente nonché delle partizioni interne sono indicati nella tabella 1.4.

Tabella 1.4. Elementi di involucro e partizioni interne con indicazione della stratigrafia e delle caratteristiche termiche dei materiali

| **Elemento (int-est)** | ***s* [cm]** | **$\rho$ [kg/m$^3$]** | ***c* [J/(kg K)]** | **$\lambda$ [W/(m K)]** | ***R* [(m$^2$K)/W]** |
|---|---|---|---|---|---|
| Parete esterna | | | | | |
| Laterizio forato | 30,0 | 1400 | 840 | 0,50 | - |
| Isolante termico | 10,3 | 15 | 1250 | 0,04 | - |
| Solaio contro terra | | | | | |
| Calcestruzzo | 20,0 | 2400 | 880 | 2,00 | - |
| Isolante termico | 12,3 | 40 | 1600 | 0,04 | - |
| Copertura | | | | | |
| Solaio in latero-cemento | 26,0 | 1800 | 840 | - | 0,35 |
| Isolante termico | 4,0 | 15 | 1250 | 0,047 | - |
| Bitume | 0,2 | 1200 | 920 | 0,17 | - |
| Parete vano scala | | | | | |
| Laterizio forato | 30,0 | 1400 | 840 | 0,50 | - |
| Solaio sottotetto | | | | | |
| Calcestruzzo | 20,0 | 2400 | 880 | 2,00 | - |
| Isolante termico | 11,9 | 40 | 1600 | 0,04 | - |
| Porta | | | | | |
| Legno | 6,0 | 550 | 2700 | 0,15 | - |
| Parete interna | | | | | |

| **Elemento (int-est)** | ***s* [cm]** | **$\rho$ [kg/m$^3$]** | ***c* [J/(kg K)]** | **$\lambda$ [W/(m K)]** | ***R* [(m$^2$K)/W]** |
|---|---|---|---|---|---|
| Laterizio forato | 15,0 | 1400 | 840 | 0,50 | - |
| Solaio interpiano | | | | | |
| Calcestruzzo | 20,0 | 2400 | 880 | 2,00 | - |

All'interno delle tabelle 1.5 e 1.6 sono riportate le resistenze termiche liminari esterne rispettivamente per la località di Torino e Istanbul. Tali coefficienti sono stati ricavati secondo quanto specificato nell'equazione 1.43 e sono stati utilizzati per i calcoli attraverso le metodologie semplificate.

Gli stessi risultati si sono ottenuti per i componenti vetrati ottenendo risultati analoghi.

Tabella 1.5 Resistenze termiche liminari ($R_{se}$) medie mensili ricavate da *EnergyPlus* per le pareti opache del caso di studio localizzato a Torino.

| | **Resistenze termiche liminari esterne $R_{se}$ [(m$^2$ K)/W]** | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **gen** | **feb** | **mar** | **apr** | **mag** | **giu** | **lug** | **ago** | **set** | **ott** | **nov** | **dic** |
| NORD | 0,16 | 0,15 | 0,14 | 0,13 | 0,13 | 0,12 | 0,12 | 0,13 | 0,14 | 0,15 | 0,15 | 0,16 |
| SUD | 0,16 | 0,14 | 0,13 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,13 | 0,13 | 0,14 | 0,15 | 0,15 |
| EST | 0,16 | 0,15 | 0,14 | 0,13 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,13 | 0,14 | 0,14 | 0,15 | 0,16 |
| OVEST | 0,15 | 0,12 | 0,10 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,11 | 0,12 | 0,13 | 0,13 | 0,14 |
| COPERTURA | 0,17 | 0,15 | 0,13 | 0,12 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,12 | 0,13 | 0,14 | 0,15 | 0,16 |

Tabella 1.6 Resistenze termiche liminari ($R_{se}$) medie mensili ricavate da *EnergyPlus* per le pareti opache del caso di studio localizzato a Istanbul.

| | **Resistenze termiche liminari esterne *[(m$^2$ K)/W]*** | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **gen** | **feb** | **mar** | **apr** | **mag** | **giu** | **lug** | **ago** | **set** | **ott** | **nov** | **dic** |
| NORD | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,07 | 0,05 | 0,07 | 0,04 | 0,02 | 0,01 | 0,02 |
| SUD | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,07 | 0,06 | 0,08 | 0,04 | 0,02 | 0,01 | 0,02 |
| EST | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,07 | 0,05 | 0,07 | 0,04 | 0,02 | 0,01 | 0,02 |
| OVEST | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,07 | 0,06 | 0,08 | 0,04 | 0,02 | 0,01 | 0,02 |
| COPERTURA | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,07 | 0,06 | 0,07 | 0,04 | 0,02 | 0,01 | 0,02 |

Il tasso di ventilazione è stato fissato a 0,3 h$^{-1}$ costante sia in periodo di riscaldamento che di raffrescamento mentre il vano scala e il sottotetto non climatizzati sono stati ipotizzati privi di ventilazione, sia verso l'interno sia verso l'esterno.

Al fine di calcolare il coefficiente di scambio termico per ventilazione, un valore medio mensile di $\rho_a \cdot c_a$ è stato ricavato da *EnergyPlus* secondo l'equazione 1.53 ottenendo i valori indicati nella tabella seguente.

Tabella 1.7. Valori medi mensili di $\rho_a \cdot c_a$ ricavate attraverso *EnergyPlus* per le località di Torino e di Istanbul

| | $\rho_a \cdot c_a$ [J/(m$^3$ K)] | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **gen** | **feb** | **mar** | **apr** | **mag** | **giu** | **lug** | **ago** | **set** | **ott** | **nov** | **dic** |
| Torino | 1263 | 1257 | 1235 | 1224 | 1209 | 1196 | 1191 | 1192 | 1199 | 1218 | 1240 | 1258 |
| Istanbul | 1287 | 1288 | 1278 | 1249 | 1236 | 1219 | 1221 | 1226 | 1222 | 1235 | 1261 | 1278 |

Gli apporti interni sono stati fissati pari a 4,12 W/m$^2$ per ogni appartamento di superficie netta pari a 75,14 m$^2$ secondo quanto indicato nella specifica tecnica UNI/TS 11300-1.

Per quanto riguarda gli apporti solari, sono stati calcolati quelli entranti sia attraverso gli elementi vetrati sia attraverso gli elementi di involucro opaco. Si sono altresì considerati gli apporti solari entranti all'interno del vano scala non climatizzato mentre si sono ritenuti trascurabili gli apporti solari entranti all'interno del sottotetto non climatizzato.

La trasmittanza solare dei vetri è stata calcolata secondo l'equazione 1.59 considerando il fattore di esposizione $F_w$ pari a quanto calcolato attraverso la 1.64 a partire da valori ottenuti da *EnergyPlus*.

Alcuni valori del fattore di esposizione medi mensili calcolati per i vetri del caso di studio sono riportati nella tabella seguente per le località di Torino e Istanbul.

Tabella 1.8. Valori medi mensili del fattore di esposizione $F_w$ ricavati attraverso *EnergyPlus* per le località di Torino e di Istanbul

| **Fattore di esposizione $F_w$ [-]** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **Torino** | | **Istanbul** | |
| | **NORD** | **SUD** | **NORD** | **SUD** |
| **gen** | 0,82 | 0,92 | 0,82 | 0,90 |
| **feb** | 0,82 | 0,89 | 0,83 | 0,87 |
| **mar** | 0,82 | 0,84 | 0,83 | 0,83 |
| **apr** | 0,82 | 0,80 | 0,82 | 0,77 |
| **mag** | 0,81 | 0,72 | 0,80 | 0,70 |
| **giu** | 0,81 | 0,71 | 0,78 | 0,66 |
| **lug** | 0,81 | 0,70 | 0,77 | 0,64 |
| **ago** | 0,82 | 0,76 | 0,81 | 0,70 |
| **set** | 0,83 | 0,83 | 0,82 | 0,79 |
| **ott** | 0,82 | 0,88 | 0,83 | 0,87 |
| **nov** | 0,82 | 0,89 | 0,82 | 0,89 |
| **dic** | 0,82 | 0,90 | 0,82 | 0,89 |

Nelle tabelle seguenti sono riportati i valori del fabbisogno di energia termica per riscaldamento e raffrescamento, rispettivamente calcolati con i metodi mensile quasi stazionario, orario semplificato e dinamico per la località di Torino (tabella 1.9) e per Istanbul (tabella 1.10).

Da quanto risulta, i metodi semplificati tendono a sovrastimare sia il fabbisogno in periodo di riscaldamento sia il fabbisogno in periodo di raffrescamento.

Durante la stagione invernale il metodo orario semplificato sovrastima i fabbisogni di circa l'11% rispetto al metodo dinamico dettagliato, mentre il metodo mensile quasi stazionario sovrastima i fabbisogni di circa il 14% per la località climatica di Torino; di circa il 18,5% e di circa il 13% per la località di Istanbul.

Per il periodo di raffrescamento si notano invece scostamenti maggiori del fabbisogno calcolato con metodo mensile quasi stazionario. Per la località di Torino infatti la differenza risulta notevole: il fabbisogno per raffrescamento calcolato con metodo mensile è circa quattro volte quello calcolato con il metodo dinamico dettagliato, mentre lo scostamento tra il metodo orario semplificato e il metodo dinamico dettagliato rimane sostenuto in termini assoluti, sebbene di una certa rilevanza in termini percentuali date le piccole quantità in gioco.

Lo stesso per la località di Istanbul: lo scostamento del fabbisogno calcolato con il metodo orario semplificato è di circa il 19% rispetto al dinamico dettagliato mentre il metodo mensile è circa tre volte tanto.

In particolare, la differenza risulta rilevante durante i mesi intermedi compresi tra il periodo di riscaldamento e quello di raffrescamento. Durante i mesi di aprile, maggio, giugno, settembre e ottobre per Torino si hanno infatti elevati scostamenti in termini percentuali tra i metodi. Lo stesso scostamento elevato si ha durante i mesi di aprile, maggio, ottobre e novembre per Istanbul.

In tali mesi infatti, attraverso il metodo mensile quasi stazionario e il metodo orario semplificato, risultano esservi fabbisogni sia di riscaldamento che di raffrescamento all'interno dello stesso mese mentre attraverso il calcolo dinamico la zona termica non richiede né riscaldamento né raffrescamento.

Le figure 1.13 e 1.14 mostrano i profili della temperatura esterna per i mesi di maggio e settembre per la località di Torino e i profili orari delle temperature interne calcolate attraverso il metodo orario semplificato e *EnergyPlus*.

Le figure 1.15 e 1.16 mostrano gli stessi profili per i mesi di maggio e ottobre per la località di Istanbul.

In entrambi i casi risulta evidente che i profili di temperatura interna calcolati attraverso il metodo orario semplificato oscillano con ampiezza maggiore rispetto a quelli calcolati attraverso *EnergyPlus*.

Ne risulta che le temperature calcolate con metodo orario raggiungono picchi giornalieri che talvolta risultano minori della temperatura di *set-point* invernale (20°C) e talvolta risultano maggiori della temperatura di *set-point* estiva (26°C): l'edificio pertanto richiede sia energia per il riscaldamento che energia per il raffrescamento.

Diversamente, attraverso *EnergyPlus* le temperature interne oscillano in maniera minore e pertanto risultano quasi sempre maggiori di 20°C e minori di 26°C.

Questo scostamento tra metodi può essere causato prevalentemente dalla sottostima dell'inerzia termica dell'edificio da parte metodo orario semplificato.

Le suddette deviazioni sono anche all'origine di differenze nella durata dei periodi di riscaldamento e raffrescamento. Come si può notare dalla tabella 1.9, per Torino, il numero di giorni di riscaldamento definiti mediante il metodo semplificato supera del 12% quello ricavato con il metodo dinamico, mentre per quanto riguarda la durata del periodo di raffrescamento il calcolo semplificato lo sovrastima del 50% rispetto al metodo dinamico.

In figura 1.11 sono indicati i periodi di riscaldamento e raffrescamento in megasecondi [Ms] calcolati attraverso il metodo orario semplificato ed *EnergyPlus*.

Per la località di Istanbul, il metodo semplificato sovrastima del 4% la durata del periodo di riscaldamento rispetto al metodo dinamico dettagliato, e del 18% il periodo di raffrescamento (tabella 1.10 e figura 1.12)).

Tabella 1.9. Fabbisogno di energia termica e giorni di riscaldamento e raffrescamento per i tre metodi analizzati (Torino)

| | **UNI EN ISO 13790 – mensile quasi stazionario** | **UNI EN ISO 13790 – orario semplificato** | ***EnergyPlus*** |
|---|---|---|---|
| $Q_{H,nd}$ [kWh/m$^2$] | 43,17 | 41,96 | 37,86 |
| $Q_{C,nd}$ [kWh/m$^2$] | 16,40 | 6,37 | 4,21 |
| Durata del periodo di riscaldamento[d] | - | 207 | 185 |
| Durata del periodo di raffrescamento [d] | - | 84 | 56 |

Tabella 1.10. Fabbisogno di energia termica e giorni di riscaldamento e raffrescamento per i tre metodi analizzati (Istanbul)

| | **UNI EN ISO 13790 – mensile quasi stazionario** | **UNI EN ISO 13790 – orario semplificato** | ***EnergyPlus*** |
|---|---|---|---|
| $Q_{H,nd}$ [kWh/m$^2$] | 24,59 | 25,79 | 21,76 |
| $Q_{C,nd}$ [kWh/m$^2$] | 27,21 | 12,52 | 10,52 |
| Durata del periodo di riscaldamento[d] | - | 161 | 155 |
| Durata del periodo di raffrescamento [d] | - | 129 | 109 |

Si considerino le figure e tabelle successive per avere un confronto mensile tra i tre metodi.

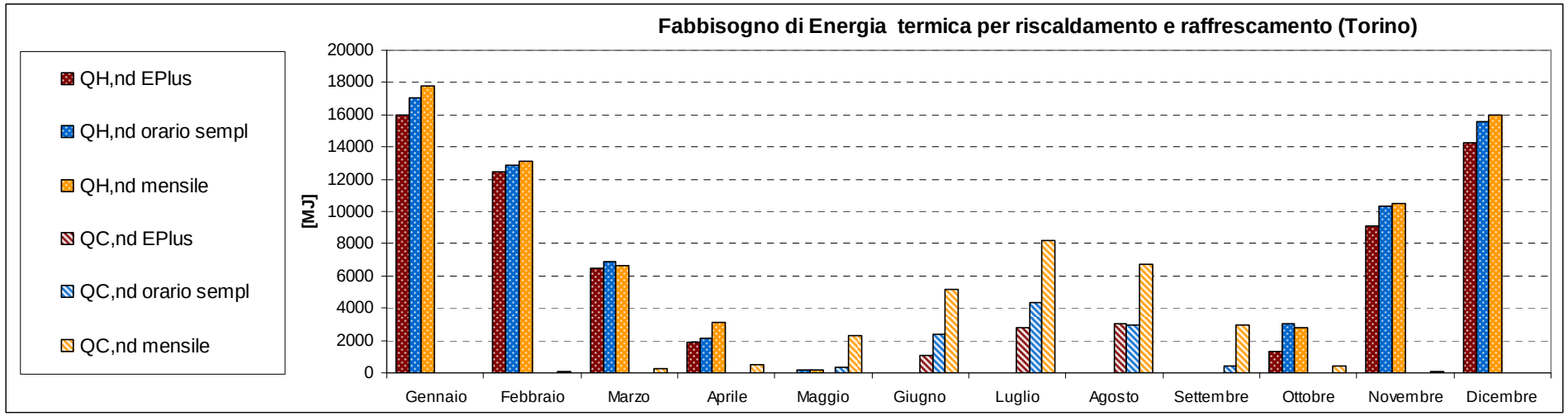



Figura 1.9. Risultati medi mensili relativi al fabbisogno di energia termica per riscaldamento/raffrescamento calcolata con i tre metodi di calcolo (Torino).

Tabella 1.11. Valori mensili del fabbisogno di energia termica per riscaldamento/raffrescamento calcolato con i tre metodi di calcolo (Torino).

| | | Gen | Feb | Mar | Apr | Mag | Giu | Lug | Ago | Set | Ott | Nov | Dic |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Metodo mensile quasi stazionario | $Q_{H,nd}$ [MJ] | 17761 | 13075 | 6610 | 3151 | 202 | 0 | 0 | 0 | 37 | 2781 | 10466 | 16000 |
| | $Q_{C,nd}$ [MJ] | 13 | 46 | 285 | 479 | 2311 | 5171 | 8173 | 6746 | 2913 | 435 | 41 | 19 |
| Metodo orario semplificato | $Q_{H,nd}$ [MJ] | 17012 | 12828 | 6919 | 2162 | 195 | 0 | 0 | 0 | 36 | 3063 | 10317 | 15591 |
| | $Q_{C,nd}$ [MJ] | 0 | 0 | 0 | 0 | 289 | 2391 | 4317 | 2945 | 406 | 0 | 0 | 0 |
| Metodo dinamico dettagliato | $Q_{H,nd}$ [MJ] | 16023 | 12454 | 6450 | 1879 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1286 | 9135 | 14243 |
| | $Q_{C,nd}$ [MJ] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1077 | 2749 | 3017 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabella 1.12. Differenze percentuali mensili tra i metodi di calcolo semplificati e il metodo dinamico dettagliato (Torino).

| | | Gen | Feb | Mar | Apr | Mag | Giu | Lug | Ago | Set | Ott | Nov | Dic |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Differenza tra metodo orario semplificato/*EPlus* | $Q_{H,nd}$ [%] | 6 | 3 | 7 | 15 | | - | - | - | | 138 | 13 | 9 |
| | $Q_{C,nd}$ [%] | - | - | - | - | | 122 | 57 | -2 | | - | - | - |
| Differenza tra metodo mensile quasi stazionario/*EPlus* | $Q_{H,nd}$ [%] | 11 | 5 | 2 | 68 | | - | - | - | | 116 | 15 | 12 |
| | $Q_{C,nd}$ [%] | - | - | - | - | | 380 | 197 | 124 | | - | - | - |

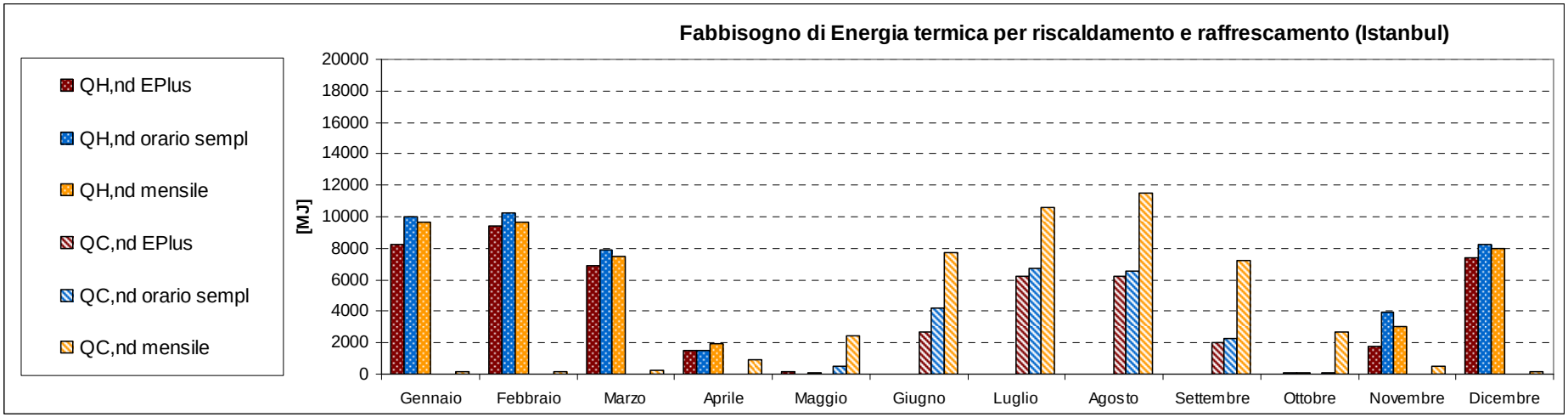



Figura 1.10. Risultati medi mensili relativi al fabbisogno di energia termica per riscaldamento/raffrescamento calcolata con i tre metodi di calcolo (Istanbul).

Tabella 1.13. Valori mensili del fabbisogno di energia termica per riscaldamento/raffrescamento calcolato con i tre metodi di calcolo (Istanbul).

| | | Gen | Feb | Mar | Apr | Mag | Giu | Lug | Ago | Set | Ott | Nov | Dic |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Metodo mensile quasi stazionario | $Q_{H,nd}$ [MJ] | 9625 | 9686 | 7512 | 1923 | 86 | 0 | 0 | 0 | 0 | 104 | 3043 | 7951 |
| | $Q_{C,nd}$ [MJ] | 172 | 136 | 265 | 896 | 2405 | 7691 | 10567 | 11490 | 7189 | 2694 | 530 | 145 |
| Metodo orario semplificato | $Q_{H,nd}$ [MJ] | 9985 | 10284 | 7890 | 1497 | 24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 61 | 3909 | 8217 |
| | $Q_{C,nd}$ [MJ] | 0 | 0 | 0 | 0 | 493 | 4230 | 6738 | 6573 | 2245 | 53 | 0 | 0 |
| Metodo dinamico dettagliato | $Q_{H,nd}$ [MJ] | 8238 | 9402 | 6908 | 1471 | 172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1723 | 7414 |
| | $Q_{C,nd}$ [MJ] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2665 | 6184 | 6258 | 1976 | 0 | 0 | 0 |

Tabella 1.14. Differenze percentuali mensili tra i metodi di calcolo semplificati e il metodo dinamico dettagliato (Istanbul).

| | | Gen | Feb | Mar | Apr | Mag | Giu | Lug | Ago | Set | Ott | Nov | Dic |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Differenza tra metodo orario semplificato/*EPlus* | $Q_{H,nd}$ [%] | 21 | 9 | 14 | 2 | | - | - | - | - | | 127 | 11 |
| | $Q_{C,nd}$ [%] | - | - | - | - | | 59 | 9 | 5 | 14 | | - | - |
| Differenza tra metodo mensile quasi stazionario/*EPlus* | $Q_{H,nd}$ [%] | 17 | 3 | 9 | 31 | | - | - | - | - | | 77 | 7 |
| | $Q_{C,nd}$ [%] | - | - | - | - | | 189 | 71 | 84 | 264 | | - | - |

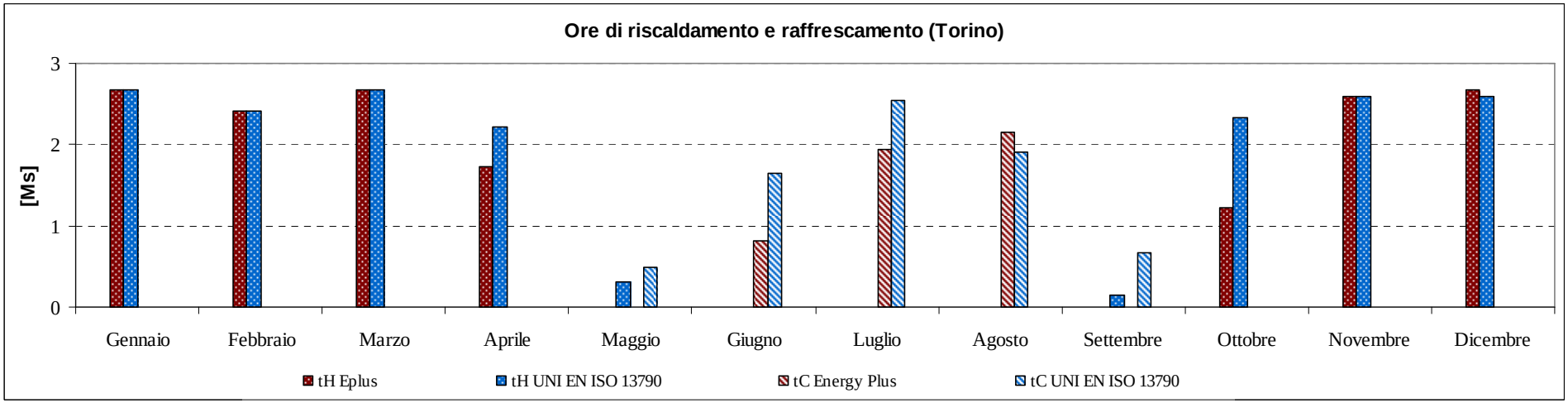



Figura 1.11. Valori mensili delle ore di attivazione del riscaldamento/raffrescamento per i metodi orario semplificato e dinamico (Torino).

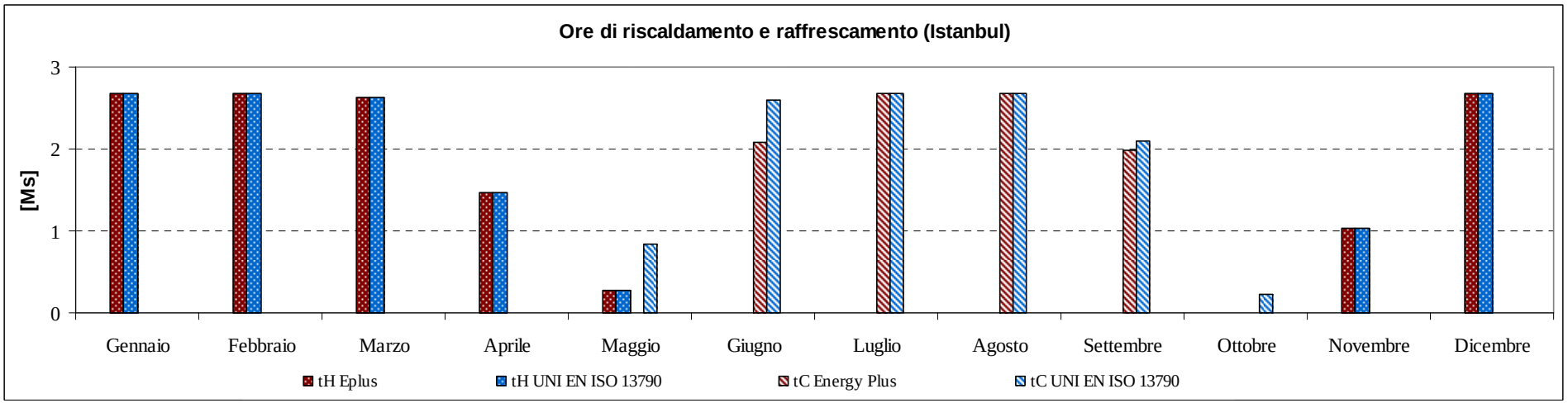



Figura 1.12. Valori mensili delle ore di attivazione del riscaldamento/raffrescamento per i metodi orario semplificato e dinamico (Istanbul).

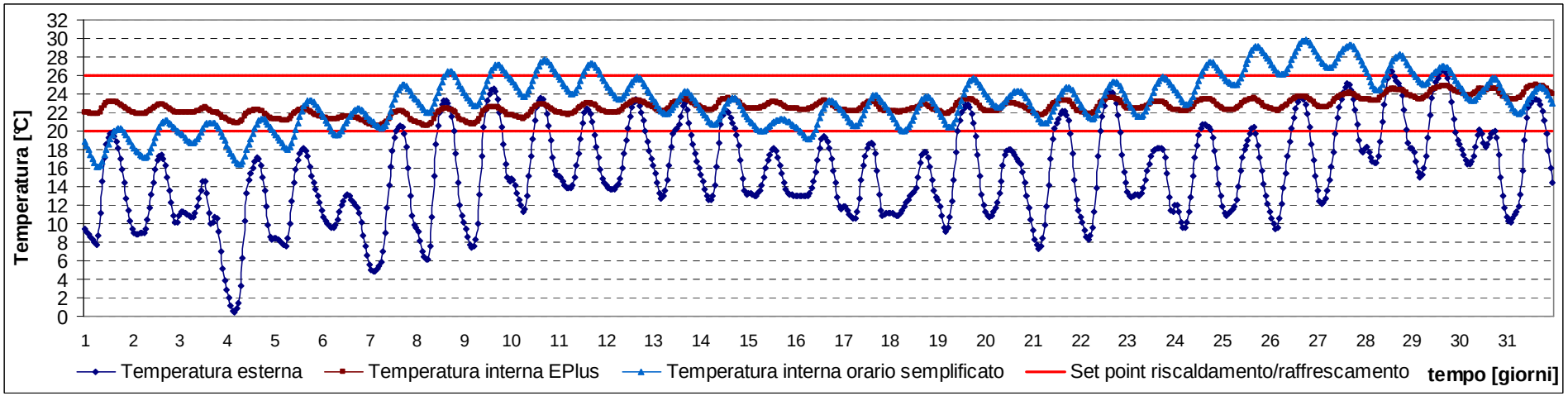



Figura 1.13. Profilo di temperatura interna calcolata attraverso i metodi orario semplificato e dinamico dettagliato e temperatura esterna (Torino – maggio).

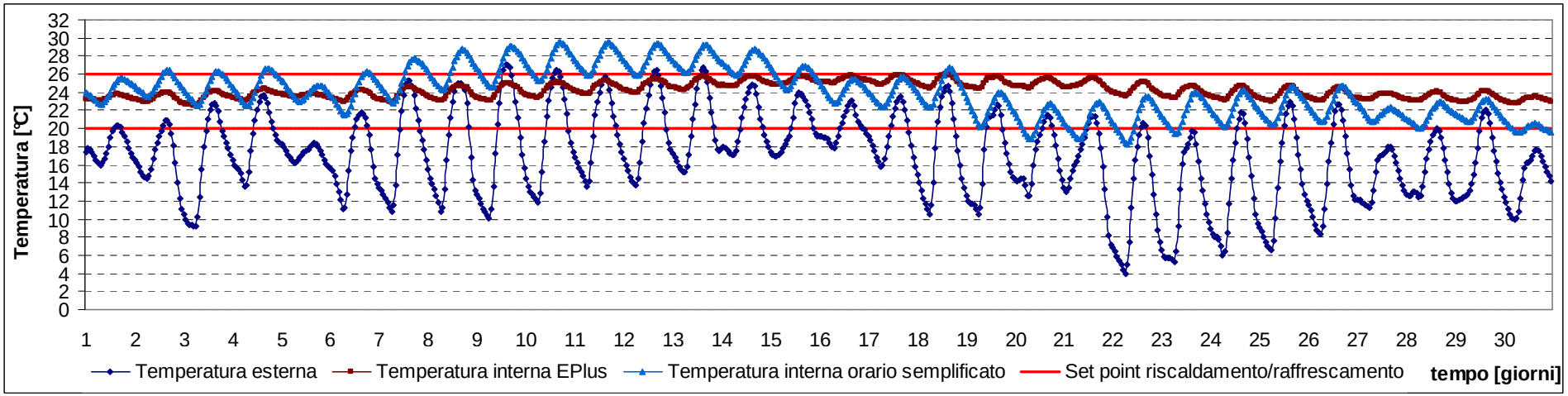



Figura 1.14. Profilo di temperatura interna calcolata attraverso i metodi orario semplificato e dinamico dettagliato e temperatura esterna (Torino – settembre).

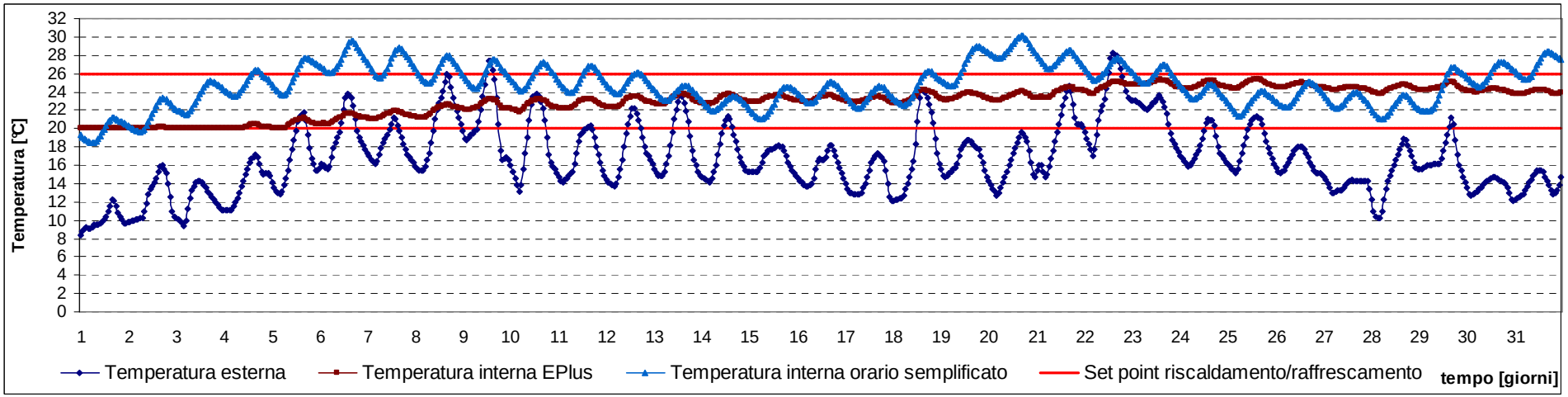



Figura 1.15. Profilo di temperatura interna calcolata attraverso i metodi orario semplificato e dinamico dettagliato e temperatura esterna (Istanbul – maggio).

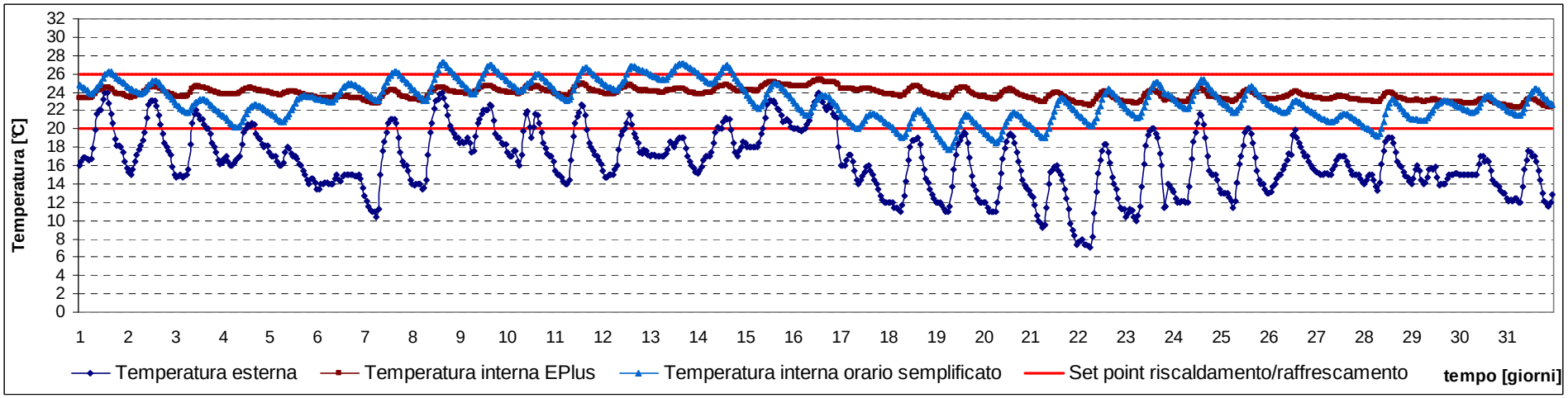



Figura 1.16. Profilo di temperatura interna calcolata attraverso i metodi orario semplificato e dinamico dettagliato e temperatura esterna (Istanbul – ottobre).

In generale si può riassumere quanto segue:

- in periodo invernale lo scostamento in termini di fabbisogno di energia termica per il riscaldamento tra i metodi UNI EN ISO 13790 e *EnergyPlus* è mediamente moderato (2÷15%);
- in periodo estivo il metodo orario semplificato approssima meglio il metodo dettagliato mentre il metodo mensile sovrastima fortemente i consumi;
- il metodo mensile si scosta dal metodo dinamico soprattutto nel periodo estivo. Questo può essere imputato al fatto che il fattore di utilizzazione non tiene adeguatamente in conto il *mismatch* tra apporti e dispersioni;
- il metodo orario semplificato si scosta dal metodo dettagliato perché sottostima l'inerzia dell'edificio. Dalle figure 1.13 – 1.16 emerge infatti che il profilo di temperatura interna calcolato con il metodo orario semplificato durante i mesi di primavera/autunno ha un andamento che oscilla maggiormente seguendo il profilo di temperatura esterna rispetto a quello calcolato con il metodo dinamico.

# 2. Analisi dei ponti termici

Il seguente capitolo riguarda il fenomeno della trasmissione del calore attraverso i ponti termici.

La caratterizzazione di un ponte termico a sviluppo lineare avviene attraverso la sua trasmittanza termica lineare ($\psi$), che esprime il flusso termico trasmesso attraverso il ponte termico per unità lunghezza e per unità di differenza di temperatura tra l'ambiente climatizzato e quello esterno.

Le fasi del lavoro sono:

- la determinazione della trasmittanza termica lineare $\psi$ attraverso calcoli alle differenze finite secondo la norma UNI EN ISO 10211, al variare dei parametri progettuali significativi;
- il confronto tra tali valori di $\psi$ calcolati e i corrispondenti valori standard secondo la norma UNI EN ISO 14683;
- la creazione di un atlante di ponti termici con l'obiettivo di fornire valori di $\psi$ per diverse tipologie di ponte termico e al variare dei parametri progettuali significativi;
- l'individuazione di equazioni di correlazione e applicazione dell'analisi di sensibilità al fine di quantificare il peso che la variazione dei parametri di ingresso ha sulla variazione di $\psi$;
- l'analisi dell'incidenza dei ponti termici sulle dispersioni termiche totali per trasmissione e sul fabbisogno di energia termica dell'edificio per alcuni casi di studio.

L'attività è stata preceduta da un'attenta analisi della letteratura in materia: normativa tecnica vigente, legislazione nazionale e regionale, articoli scientifici pubblicati in ambito nazionale e internazionale.

Quale strumento di calcolo ci si è avvalsi di codici per il calcolo alle differenze finite (TRISCO) e agli elementi finiti (THERM) per il calcolo analitico dei flussi termici, nonché di strumenti di calcolo (SimLab 2.2, IBM SPSS Statistics) per le equazioni di correlazione e l'analisi di sensibilità.

## 2.1 Il fenomeno fisico e la definizione delle tipologie di ponte termico

Il flusso termico scambiato per conduzione attraverso un elementino piano di parete è descritto dalla legge di Fourier

$$d\Phi = -\lambda \cdot dA \cdot grad\theta \tag{2.1}$$

dove:

$\lambda$ è la conducibilità termica del materiale [W/(m K)];

d$A$ è la superficie infinitesima interessata dagli scambi termici [m$^2$];

$\theta$ è la temperatura [°C].

La conduzione termica attraverso una parete piana può essere trattata come un problema monodimensionale e in regime stazionario qualora sussistano le seguenti ipotesi semplificative:

- tutte le grandezze siano costanti nel tempo;
- la temperatura superficiale delle pareti sia uniforme;
- le pareti siano piane, indefinitamente estese e composte da $n$ strati di materiali termicamente omogenei disposti in serie.

Considerando le suddette ipotesi semplificative, il flusso termico scambiato per conduzione è pari a

$$\Phi = A \cdot \frac{1}{\sum_n \frac{s_n}{\lambda_n}} \cdot \Delta \vartheta_n \tag{2.2}$$

dove:

$\Delta\theta_n$ è la differenza tra le temperature delle superfici che delimitano gli *n* strati di parete;

$A$ è la superficie interessata dallo scambio termico;

$\lambda_n$ è la conducibilità termica dell'*n*-esimo strato di materiale e $s_n$ il suo spessore.

Tuttavia l'involucro edilizio difficilmente si presenta costituito di *n* strati disposti in serie tra loro e difficilmente il materiale che li compone è termicamente omogeneo. Alcuni esempi sono costituiti da angoli tra pareti, innesti tra solai e pareti verticali, parete omogenea interrotta da pilastri ecc.

Le configurazioni geometriche e strutturali che producono deviazioni dalle condizioni di flusso termico monodimensionale sono definite di *ponte termico*.

Secondo la norma tecnica UNI EN ISO 12211, per ponte termico si intende *quella parte dell'involucro edilizio dove la resistenza termica, altrove uniforme, cambia in modo significativo per effetto della compenetrazione totale o parziale di materiali con conduttività termica diversa nell'involucro edilizio, e/o della variazione dello spessore della costruzione, e/o delle differenze tra l'area della superficie disperdente sul lato interno e quella del lato esterno, come avviene per esempio in corrispondenza delle giunzioni tra parete, pavimento e soffitto.*

Una prima classificazione dei ponti termici è la seguente:

- *ponti termici di forma*: zone in cui la deviazione dalla condizione di flusso termico monodimensionale è dovuta esclusivamente alla geometria della struttura, ovvero alla differenza della superficie disperdente tra lato interno e lato esterno per cui la dispersione varia a seconda della geometria dell'angolo;
- *ponti termici di struttura*: zone in cui la deviazione dalla condizione di flusso termico monodimensionale è dovuta esclusivamente alla presenza nella parete di un elemento costruttivo avente una diversa resistenza termica;
- *ponte termico di tipo misto*: zone in cui vi è una sovrapposizione di un ponte termico di forma con uno di struttura.

Nella pratica, un ponte termico di forma è generalmente costituito dall'angolo tra due pareti (figura 2.1a); un ponte termico di struttura può essere costituito dall'interruzione di una parete perimetrale dovuta alla presenza di un pilastro costituito da materiale diverso (figura 2.1b); un ponte termico di tipo misto può essere costituito dalla presenza di un pilastro all'intersezione tra due pareti perimetrali (figura 2.1c).

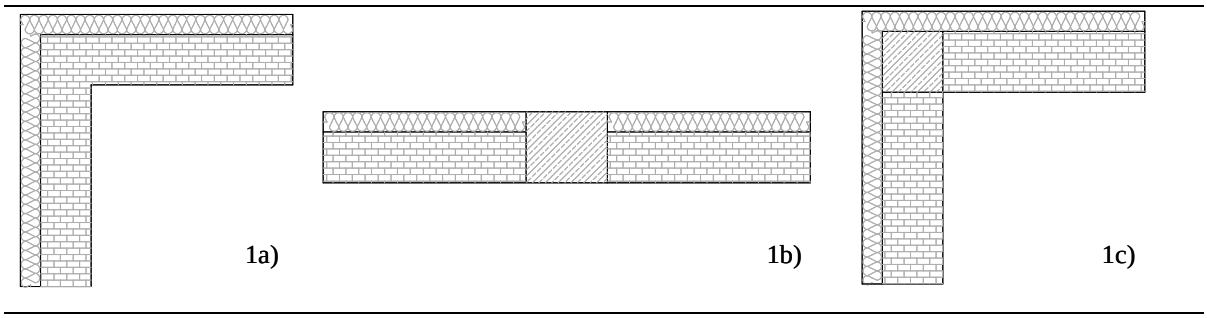



Figura 2.1. Ponte termico di forma (1a), ponte termico di struttura (1b), ponte termico misto (1c).

Ponti termici di struttura possono essere inoltre i giunti di malta presenti tra i blocchi in laterizio o ancora i tasselli a sostegno di materiale isolante: entrambi sono parti dell'involucro in cui la resistenza termica del materiale varia fortemente tanto da determinare zone in cui l'ipotesi di monodimensionalità del flusso termico non è più soddisfatta.

La UNI EN ISO 10211 permette peraltro di considerare tali strati come ponti termici con *scarsa influenza* che possono essere inclusi in *strati quasi-omogenei* ovvero *strati costituiti da due o più materiali di conduttività termica differente, che possono essere considerati omogenei con una conduttività termica equivalente*.

Per potere operare tale semplificazione, devono sussistere le condizioni seguenti:

- *gli strati di materiale in questione sono collocati in una parte della costruzione la quale, dopo le semplificazioni, diventa un elemento laterale;*
- *la conduttività termica dello strato quasi omogeneo, dopo la semplificazione, non è maggiore di oltre 1,5 volte la più piccola conduttività termica dei materiali presenti nello strato prima della semplificazione.*

Se sussistono le condizioni suddette, il calcolo della conduttività termica equivalente (ovvero della resistenza termica equivalente) si effettua secondo la UNI EN ISO 6946.

Un'altra classificazione dei ponti termici riguarda la loro estensione. I ponti termici possono pertanto essere suddivisi in:

- ponti termici lineari ovvero ponti termici con una sezione trasversale uniforme lungo uno dei tre assi ortogonali. In questo caso il flusso termico è bidimensionale;
- ponti termici puntuali ovvero ponti termici localizzati. In questo caso il flusso termico è tridimensionale.

La presenza di ponti termici può causare notevoli problematiche, classificate come segue:

- *energetiche:* la distorsione del campo termico legato alla presenza di ponti termici determina un incremento delle dispersioni di energia termica attraverso le parti dell'involucro edilizio interessate;
- *di discomfort termoigrometrico:* la presenza di un campo termico non più monodimensionale ma bi- o tridimensionale comporta una disomogeneità nel valore di temperatura superficiale delle pareti. L'eventuale riduzione della temperatura media superficiale delle pareti determina una riduzione della temperatura media radiante e

potrebbe generare situazioni di discomfort termico globale (riduzione della temperatura operante dell'ambiente) o locale (asimmetria della temperatura media radiante per effetto della presenza di pareti fredde);

- *igienico sanitarie:* se la temperatura esterna è molto inferiore a quella interna e l'umidità del locale è molto elevata, la temperatura superficiale interna nella zona di ponte termico scende al disotto della temperatura di rugiada dell'ambiente con il conseguente insorgere di fenomeni di condensazione superficiale, formazione di macchie d'umidità e/o muffe con tipico distacco dell'intonaco e/o fenomeni di termoforesi. A questo si aggiunga il fatto che la presenza di acqua condensata all'interno della struttura determina un incremento della conducibilità termica dei materiali all'interno della struttura stessa, con ulteriore aumento delle dispersioni termiche;
- *strutturali:* la disomogenea distribuzione delle temperature all'interno dei nodi strutturali portanti che costituiscono il ponte termico può provocare, nei casi più gravi, tensioni interne con conseguente progressiva degradazione dei materiali che costituiscono il nodo.

Per questi motivi è di estrema importanza un'accurata progettazione del nodo strutturale e quindi la corretta analisi delle dispersioni di calore attraverso esso.

La quantificazione delle dispersioni termiche attraverso i ponti termici avviene generalmente attraverso la determinazione di due parametri:

- la trasmittanza termica lineare $\psi$ per la quantificazione delle dispersioni di energia termica attraverso i ponti termici lineari;
- la trasmittanza termica puntuale $\chi$ per la determinazione delle dispersioni di energia termica attraverso i ponti termici puntuali.

Generalmente i ponti termici lineari hanno una rilevanza maggiore sulle dispersioni di energia termica attraverso l'involucro edilizio rispetto ai ponti termici puntuali. Per questo motivo, nonché per carenza di valori di riferimento da utilizzarsi, questi ultimi solitamente vengono trascurati. Pertanto si farà di seguito riferimento al solo calcolo della trasmittanza termica lineare, trascurando quanto concerne la trasmittanza termica puntuale.

I modelli di calcolo che possono essere impiegati al fine di valutare il flusso termico bidimensionale attraverso i ponti termici sono molteplici e si distinguono a seconda del livello di dettaglio dell'analisi e del livello di accuratezza previsto. La norma UNI EN ISO 14683 distingue i diversi metodi in relazione alla rispettiva accuratezza:

- metodi numerici (accuratezza tipica ± 5%);
- atlanti di ponti termici (accuratezza tipica ± 20%);
- calcoli manuali (accuratezza tipica ± 20%);
- valori standard (accuratezza tipica da 0% a 50%).

Sebbene non esista una vera e propria distinzione tra metodi semplificati e metodi dettagliati, solitamente i metodi di calcolo semplificati consistono nel fornire un valore precalcolato di $\psi$ in

funzione della tipologia di ponte termico: è il caso dei valori standard proposti ad esempio dalla UNI EN ISO 14683, Appendice A.

Per quanto concerne i metodi dettagliati, questi consistono nell'adozione di metodi numerici per il calcolo del flusso termico attraverso uno specifico nodo strutturale. I metodi adottati, solitamente implementati all'interno di codici di calcolo dedicati, operano alle differenze finite, agli elementi finiti o ai volumi finiti e permettono di calcolare un flusso termico multidimensionale attraverso il ponte termico oggetto di analisi. Il calcolo può essere svolto in regime stazionario o in regime dinamico, come mostra la letteratura scientifica più recente.

Vi sono poi i valori di $\psi$ forniti dagli atlanti di ponti termici la cui accuratezza è fortemente influenzata dal numero dei parametri progettuali variabili coinvolti nelle simulazioni che stanno alla base dei valori forniti. Per la stessa tipologia di ponte termico possono infatti essere forniti più di un valore di $\psi$ in modo tale da ricoprire un numero consistente di soluzioni progettuali. Secondo la UNI EN ISO 14683, gli atlanti possono permettere di raggiungere la stessa accuratezza dei metodi numerici.

## 2.2 Analisi dei modelli di calcolo semplificato

### *2.2.1 La legislazione nazionale vigente*

La legislazione nazionale vigente affronta le problematiche relative ai ponti termici attraverso il D. Lgs. 192/2005 modificato e integrato dal D. Lgs. 311/2006.

Nel caso di interventi su edifici esistenti, quali ristrutturazioni totali o parziali, manutenzione straordinaria dell'involucro edilizio ed ampliamenti volumetrici, tale decreto fissa limiti di trasmittanza termica unitaria che devono essere rispettati per le strutture opache a "ponte termico corretto". Nell'Allegato A del D. Lgs. 311/2006 si definisce "ponte termico corretto" quando la trasmittanza termica della parete fittizia (il tratto di parete esterna in corrispondenza del ponte termico) ($U_f$) supera di non più del 15% la trasmittanza termica della parete corrente ($U_{corr}$). In questo caso è ammissibile trascurare l'effetto del ponte termico nel calcolo dell'energia termica dispersa per trasmissione.

Caratterizzare attraverso un valore di trasmittanza superficiale un elemento in cui lo scambio termico non è modimensionale risulta concettualmente poco corretto; inoltre tale metodologia risulta difficilmente applicabile ai ponti termici di forma o di tipo misto.

Un metodo più corretto per il calcolo della trasmittanza della parete fittizia, per quanto non previsto dal Decreto, consiste nel calcolare il valore di $U_f$ in funzione della trasmittanza termica lineare del ponte termico ($\psi$).

Si consideri il calcolo del coefficiente di scambio termico totale per trasmissione $H_{tr}$ [W/K][1] relativo ad una porzione di parete comprendente un ponte termico e un tratto di parete piana (figura 2.2). Si considerino le dimensioni interne e si tenga conto del ponte termico attraverso la sua $\psi_i$

$$H_{tr} = A_{corr1} \cdot U_{corr1} + A_{corr2} \cdot U_{corr2} + \psi_i \cdot l \tag{2.3}$$

Considerando invece del ponte termico la sua parete fittizia

$$H_{tr} = A_{corr1} \cdot U_{corr1} + A_{corr2} \cdot U_{corr2} + A_f \cdot U_f \tag{2.4}$$

Uguagliando le due equazioni si ottiene il valore di $U_f$ in funzione di $\psi$

$$U_f = \frac{\psi_i \cdot l}{A_f} = \frac{\psi}{d} \leq 1{,}15 \cdot U_{corr} \tag{2.5}$$

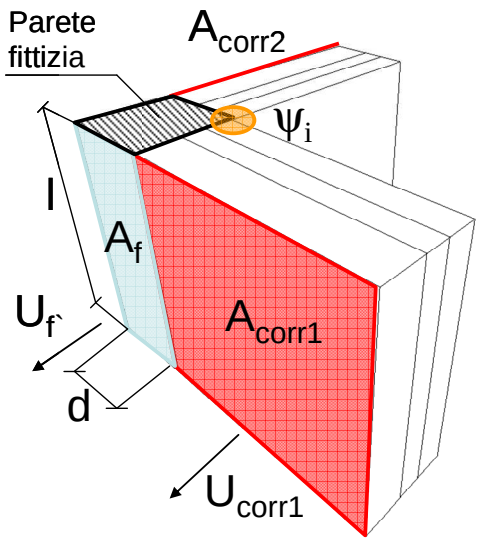



Figura 2.2: Ponte termico pilastro/pareti perimetrali con indicazione dei parametri per il calcolo di $U_f$.

Il Decreto stabilisce che, qualora il ponte termico non dovesse risultare "corretto" o qualora la progettazione dell'involucro edilizio non preveda la correzione dei ponti termici, i valori limite della trasmittanza termica (riportati nell'Allegato C del D. Lgs 311/2006) debbano essere rispettati dalla trasmittanza termica media (parete corrente più ponte termico), cioè:

$$U_m = \frac{A_{corr} \cdot U_{corr} + l \cdot \psi}{A_{corr}} \leq U_{lim} \tag{2.6}$$

[1] $H_{tr}$ è il coefficiente di scambio termico globale per trasmissione secondo quanto specificato all'interno della norma UNI EN ISO 13789. Un generico coefficiente di scambio termico per trasmissione $H_{,x}$ è dato da

$$H_x = b_{tr,x} \cdot \left( \sum_i A_i \cdot U_i + \sum_k l_k \cdot \psi_k + \sum_j \chi_j \right)$$

dove $b_{tr,x}$ è il fattore di correzione della temperatura; $A_i$ è l'area dell'*i*-esimo elemento di involucro disperdente; $U_i$ è la rispettiva trasmittanza termica; $l_k$ è la lunghezza del *k*-esimo ponte termico bidimensionale; $\psi_k$ è la rispettiva trasmittanza termica lineare [W/(m K)]; $\chi_j$ è la trasmittanza termica puntuale del *j*-esimo ponte termico tridimensionale [W/K].

dove:

$U_m$ è la trasmittanza termica media, relativa alla parete corrente più il ponte termico [W/(m$^2$ K)];

$A_{corr}$ è l'area della parete corrente [m$^2$];

$U_{corr}$ è la trasmittanza termica della parete corrente [W/(m$^2$ K)];

$l$ è la lunghezza del tratto interessato dal ponte termico [m];

$\psi$ è la trasmittanza termica lineare del ponte termico [W/(m K)];

$U_{lim}$ è il valore limite di trasmittanza termica [W/(m$^2$ K)] previsto dal D. Lgs. 311/2006.

Qualche differenza rispetto alla legislazione nazionale è contenuta all'interno della Legge Regionale 13/2007 della Regione Piemonte e successiva Deliberazione della Giunta Regionale n. 46-11968: Stralcio di piano per il riscaldamento ambientale e il condizionamento.

Nella legislazione piemontese scompare infatti il concetto di "ponte termico corretto" e si prescrive di confrontare sempre la trasmittanza media di parete con il suo valore limite.

### *2.2.2 La normativa tecnica di settore – UNI EN ISO 14683*

La trasmittanza termica lineare può essere calcolata attraverso due metodologie descritte dalla normativa tecnica di riferimento, in particolare:

- UNI EN ISO 14683:2008, Ponti termici in edilizia. Coefficiente di trasmissione termica lineare. Metodi semplificati e valori di riferimento.
- UNI EN ISO 10211:2008, Ponti termici in edilizia. Flussi termici e temperature superficiali. Calcoli dettagliati.

La norma UNI EN ISO 14683, richiamata come riferimento normativo dalla UNI/TS 11300-1, fornisce la metodologia semplificata per il calcolo delle dispersioni di energia termica attraverso i ponti termici lineari.

Essa non fornisce indicazioni sui ponti termici puntuali la cui influenza può essere trascurata. Se tuttavia sono presenti ponti termici puntuali significativi, allora la trasmittanza termica puntuale dovrebbe essere calcolata in conformità alla UNI EN ISO 10211.

La norma specifica come già accennato, le possibili modalità per il calcolo di $\psi$.

Il calcolo attraverso la metodologia numerica è quello maggiormente accurato e permette di ricavare $\psi$ in maniera rigorosa seguendo le indicazioni fornite dalla norma UNI EN ISO 10211.

In caso invece non siano disponibili dettagli sul particolare ponte termico o nel caso in cui un valore approssimato di $\psi$ sia appropriato in relazione all'accuratezza richiesta nella determinazione dello scambio termico totale, la norma permette l'utilizzo di valori standard riferiti a tipologie di ponte termico ricorrenti riportati in Appendice A della norma stessa.

In Appendice A sono quindi riportate alcune tipologie di ponte termico per le quali vengono indicati i rispettivi valori di $\psi$. Sono presenti le seguenti tipologie di ponte termico:

- le giunzioni tra elementi di involucro esterni (angoli tra pareti, tra parete e copertura, tra parete e pavimento);

- le giunzioni tra pareti interne con pareti esterne e coperture;
- le giunzioni tra pavimenti intermedi e pareti esterne;
- i pilastri nelle pareti esterne;
- in prossimità di finestre e porte.

Per quanto concerne la determinazione della trasmittanza lineare, la norma prevede l'utilizzo di tre sistemi di definizione delle dimensioni in accordo con la UNI EN ISO 13789:

- dimensioni interne, misurate tra le superfici interne finite di ogni ambiente in un edificio (escluso lo spessore delle partizioni interne) ($\psi_i$);
- dimensioni interne totali, misurate tra le superfici interne finite degli elementi esterni dell'edificio (incluso quindi lo spessore delle partizioni interne) ($\psi_{oi}$);
- dimensioni esterne, misurate tra le superfici esterne finite degli elementi esterni dell'edificio ($\psi_e$).

L'utilizzo di valori standard implica notevoli approssimazioni per diversi motivi: in primo luogo i valori di $\psi$ forniti in Appendice sono calcolati per alcune tipologie edilizie che non ricoprono la totalità delle tecnologie costruttive oggi a disposizione sul territorio nazionale; inoltre i parametri utilizzati per il calcolo di $\psi$ (condizioni al contorno, parametri geometrici e caratteristiche fisico - tecniche dei materiali) sono prefissati e tendono ad una sovrastima cautelativa delle dispersioni di energia termica attraverso i giunti.

Per questi motivi viene raccomandata dalla norma stessa la possibilità di estendere o sostituire i valori forniti nel prospetto, se necessario, su base nazionale, al fine di contemplare i dettagli costruttivi tipicamente utilizzati.

### *2.2.3 Gli atlanti di ponti termici*

Per quanto riguarda l'utilizzo degli atlanti di ponti termici, la norma UNI EN ISO 14683 ne permette l'utilizzo solo nel caso in cui le dimensioni e le proprietà termofisiche del nodo inserito nell'atlante siano simili a quelle del dettaglio considerato o termicamente meno favorevoli.

*Tuttavia si possono utilizzare atlanti più flessibili, con database, dove si possono variare le dimensioni e i materiali: l'accuratezza diventa in questo caso quella del calcolo numerico.*

L'atlante deve quindi fornire le seguenti informazioni:

- indicazioni chiare sull'ottenimento dei valori di $\psi$;
- dimensioni del dettaglio considerato e valori della trasmittanza termica delle parti omogenee del dettaglio;
- resistenze superficiali interna ed esterna utilizzate per il calcolo dei valori indicati nell'atlante.

I calcoli numerici attraverso cui vengono determinati i valori di $\psi$ dell'atlante devono essere condotti in conformità alla UNI EN ISO 10211.

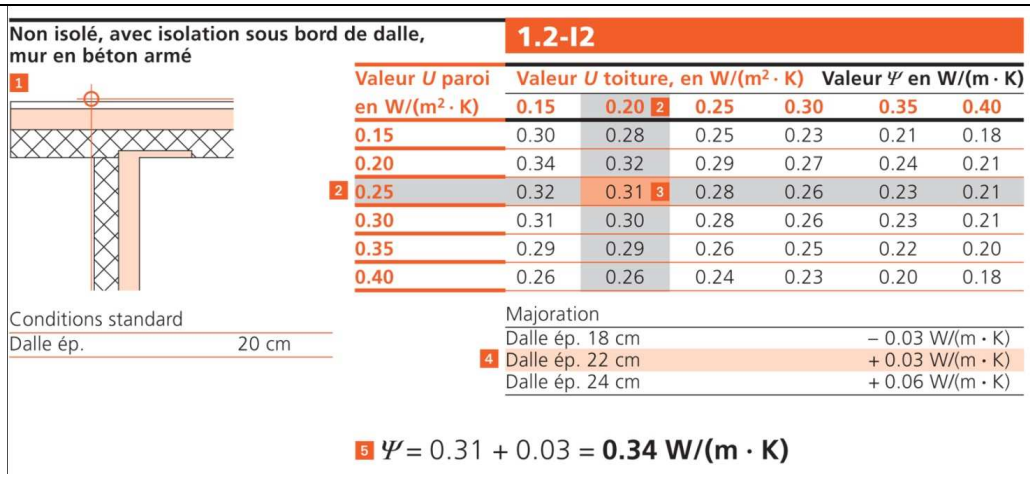
Al fine di sviluppare un atlante di ponti termici, sono stati analizzati gli atlanti di ponti termici presenti a livello nazionale e internazionale. I principali consultati sono i seguenti:

- *Catalogue des ponts thermiques* (svizzero)
- RULES Th – K77 (francese)
- UNI 7357:(1974). Foglio di aggiornamento 3:(1989)
- Abaco dei ponti termici (Regione Lombardia)
- *Catalog of thermal bridges in commercial and multi-family construction* (Nuova Zelanda)

<u>*Catalogue des ponts thermiques*</u>

Il *Catalogue des ponts thermiques* sostituisce il foglio tecnico "Dati contabili per ponti termici nella prova di isolamento" e completa altri cataloghi di ponti termici della SIA (Société suisse des Ingénieurs et des Architectes) già esistenti. Esso si rivolge agli architetti, professionisti della costruzione e delle tecnologie nell'edilizia.

Tale atlante fornisce valori di $\psi$ per i ponti termici lineari e valori di $\chi$ per ponti termici puntuali. Per ogni ponte termico vengono individuati un set di valori di $\psi$ (o di $\chi$), principalmente al variare della trasmittanza termica U delle pareti adiacenti al nodo (figura 2.3). Si considera che i valori compresi tra quelli esplicitati siano interpolabili linearmente. Inoltre per ogni ponte termico sono individuate altre variabili progettuali (ad esempio lo spessore del solaio) che influiscono sulle dispersioni incrementando o diminuendo il valore di $\psi$ precedentemente ottenuto.



**Non isolé, avec isolation sous bord de dalle, mur en béton armé** — **1.2-I2**

1

Conditions standard
Dalle ép. 20 cm

| Valeur *U* paroi en W/(m² · K) | Valeur *U* toiture, en W/(m² · K) 0.15 | 0.20 2 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.15 | 0.30 | 0.28 | 0.25 | 0.23 | 0.21 | 0.18 |
| 0.20 | 0.34 | 0.32 | 0.29 | 0.27 | 0.24 | 0.21 |
| 2 0.25 | 0.32 | 0.31 3 | 0.28 | 0.26 | 0.23 | 0.21 |
| 0.30 | 0.31 | 0.30 | 0.28 | 0.26 | 0.23 | 0.21 |
| 0.35 | 0.29 | 0.29 | 0.26 | 0.25 | 0.22 | 0.20 |
| 0.40 | 0.26 | 0.26 | 0.24 | 0.23 | 0.20 | 0.18 |

Valeur Ψ en W/(m · K)

| Majoration | |
|---|---|
| Dalle ép. 18 cm | – 0.03 W/(m · K) |
| 4 Dalle ép. 22 cm | + 0.03 W/(m · K) |
| Dalle ép. 24 cm | + 0.06 W/(m · K) |

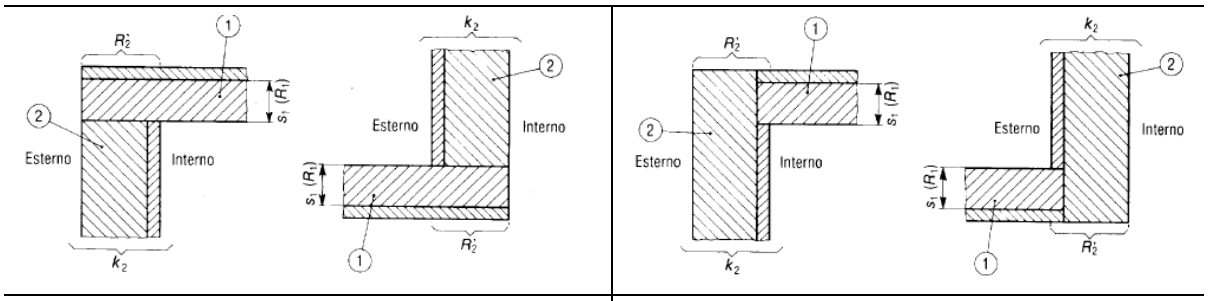
5 Ψ = 0.31 + 0.03 = **0.34 W/(m · K)**

Figura 2.3. Catalogue des ponts thermiques. Esempio di ponte termico

L'atlante risulta particolarmente intuitivo da utilizzare e ricopre un ampio novero di tipologie di ponte termico. Nonostante ciò risulta essere carente di nodi utilizzati in realtà territoriali più vaste concentrandosi su tipologie costruttive tipiche del territorio svizzero.

<u>Rules Th – K77 e UNI 7357</u>

Gli atlanti forniti all'interno della Rules Th – K77 e della UNI 7357 (figura 2.4) sono redatti su medesimo modello e forniscono sia valori di $\psi$ tabellati ed interpolabili al pari dell'atlante svizzero, sia valori di $\psi$ ricavabili attraverso semplici equazioni che permettono di correlare tali valori con le principali variabili in ingresso.




$$k = \frac{0{,}3\, s_1\, (1 + h)}{0{,}06 + R_1 + R_2'} \qquad k = \frac{0{,}3\, s_1\, (1 + h)}{0{,}06 + 0{,}5\, R_1 + R_2'}$$

Figura 2.4. Rules Th – K77. Esempio di ponte termico.

Tale impostazione è facile da utilizzare e vi sono numerosi dettagli analizzati. Entrambi gli atlanti sono però datati (l'atlante francese è del 1977) e non risultano implementati nuovi dettagli costruttivi utilizzati nella prassi costruttiva attuale.

<u>Abaco della Regione Lombardia</u>

L'Abaco dei ponti termici della Lombardia (figura 2.5) è stato sviluppato dal Politecnico di Milano in collaborazione con Cestec S.p.A. e l'Associazione regionale dei costruttori edili lombardi è stato pubblicato di recente (settembre 2011). Anche questo atlante utilizza correlazioni matematiche che permettono di ottenere valori di $\psi$ per ogni ponte termico analizzato al variare di alcuni parametri al contorno.

Al fine di individuare la tipologia di ponti termici da analizzare, è stata condotta una ricerca volta a identificare la tipologia di ponte termico più frequente per edifici caratteristici del parco edilizio regionale.

Per ogni tipologia di ponte termico (per un totale di 90 ponti termici) sono state effettuate simulazioni numeriche attraverso un codice di calcolo ai volumi finiti al variare di determinati parametri di ingresso . Al fine di correlare i dati di ingresso con le trasmittanze termiche lineari, sono state individuate delle equazioni di correlazione lineare per due sistemi di dimensione (dimensione interna e dimensione esterna).

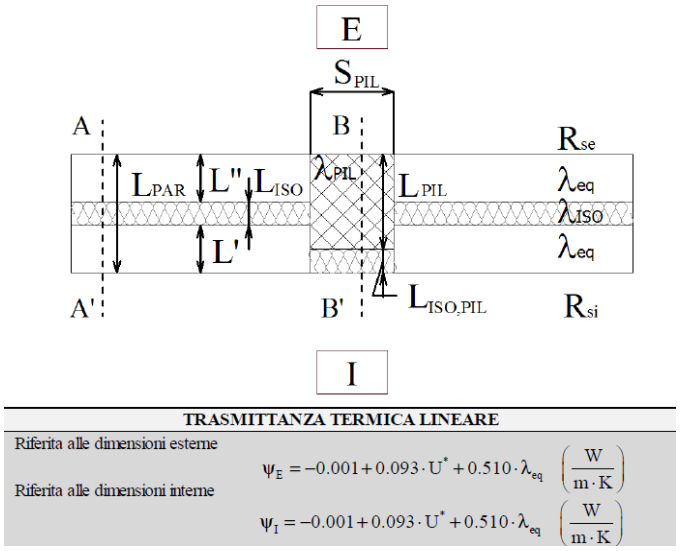



Figura 2.5. Abaco dei ponti termici della Lombardia. Esempio di ponte termico

*Catalog of thermal bridges in commercial and multi-family construction*

Per ultimo l'atlante neo zelandese (*Catalog of thermal bridges in commercial and multi-family construction*) prodotto da *LHB Engineers & Architects for the Minnesota Department of Commerce* ha lo scopo di mostrare la soluzione di dettagli costruttivi termici nella progettazione degli edifici in climi freddi e non fornisce invece alcuna quantificazione delle dispersioni.

Per ogni ponte termico analizzato è individuato il nodo strutturale con localizzazione del principale flusso termico uscente attraverso di esso e quindi sono fornite diverse soluzioni progettuali di riduzione del ponte termico.

## 2.3 Studio teorico per la caratterizzazione analitica

### *2.3.1 La normativa tecnica di settore – UNI EN ISO 10211*

Scopo della norma UNI EN ISO 10211 è la *definizione delle specifiche di un modello geometrico tridimensionale e bidimensionale di un ponte termico per il calcolo numerico dei flussi termici, per la stima delle dispersioni termiche totali di un edificio o di parte di questo e per il calcolo delle temperature superficiali minime per valutare il rischio di condensazione superficiale.*

*La norma specifica i limiti geometrici del modello e i criteri da adottare per la sua suddivisione, le condizioni termiche al contorno, i valori termici e le relazioni da utilizzare. Può essere inoltre utilizzata per ricavare i valori della trasmittanza termica lineare e puntuale ed i fattori di temperatura superficiale.*

Le dispersioni di energia termica attraverso la superficie di un edificio comprendono:

- una quota di flussi termici monodimensionali attraverso le superfici piane di involucro opaco e trasparente,
- una quota bidimensionale in prossimità dei ponti termici lineari,
- una quota tridimensionale in prossimità dei ponti termici puntuali.

Al fine di calcolare il flusso di energia termica disperso dall'intero involucro è pertanto necessario suddividere l'edificio nelle sue parti, non essendo solitamente possibile rappresentare il comportamento termico di un intero edificio con un solo modello geometrico.

La suddivisione dell'edificio nelle sue parti rispettivamente interessate da flussi termici mono - bi - tri - dimensionali, viene effettuata attraverso l'utilizzo di piani di taglio ovvero piani costruttivi che definiscono i contorni di un modello 3-D o di un modello 2-D, separandolo dal resto della costruzione.

I piani di taglio sono quindi piani adiabatici che separano le porzioni di edificio caratterizzate da flussi termici a diverse dimensioni.

In figura 2.6 è illustrata la suddivisione dell'edificio, attraverso i piani di taglio, nelle sue componenti monodimensionali (caratterizzate ciascuna da una trasmittanza termica unitaria $U_1$, $U_2$ ecc.), bidimensionali (caratterizzate da un coefficiente di accoppiamento termico $L_{2D}$) e tridimensionali (caratterizzate da un coefficiente di accoppiamento termico $L_{3D}$).

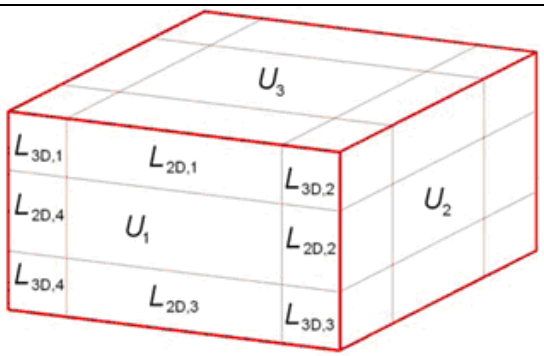



Figura 2.6. Suddivisione dell'edificio nelle sue componenti monodimensionali, bidimensionali e tridimensionali per il calcolo di $H_{tr}$.

In presenza di due sole temperature al contorno, il calcolo del flusso termico attraverso l'intero involucro edilizio, $H_{tr}$, riferito ad una differenza di temperatura unitaria, è dato da:

$$H_{tr} = \sum_{k=1}^{Nk} U_k \cdot A'_k + \sum_{m=1}^{Nm} L_{2D,m} \cdot l_m + \sum_{n=1}^{Nn} L_{3D,n} \tag{2.7}$$

dove i termini $L_{2D,m}$ e $L_{3D,n}$ sono rispettivamente i flussi termici scambiati attraverso i ponti termici lineari [W/(m·K)] e puntuali [W/K]; $A'_k$ [m$^2$] è la superficie interessata dagli scambi termici monodimensionali come indicato in figura 2.7 a); $l_m$ [m] è la lunghezza dei tratti di parete interessati dagli scambi termici bidimensionali.

Lo stesso calcolo può essere effettuato utilizzando i valori della trasmittanza termica lineare ($\psi$) e puntuale ($\chi$), al posto dei coefficienti di scambio termico, con la sola differenza che in questo caso $\Sigma$ $A_k$ equivale alla superficie totale dell'elemento edilizio, secondo la figura 2.7 b):

$$H_{tr} = \sum_{k=1}^{Nk} U_k \cdot A_k + \sum_{m=1}^{Nm} \psi_m \cdot l_m + \sum_{n=1}^{Nn} \chi_n \tag{2.8}$$

dove:

$\psi_m$ è la trasmittanza termica lineare della *m*-esima parte dell'involucro dell'edificio;

$\chi_n$ è la trasmittanza termica puntuale della *n*-esima parte dell'involucro dell'edificio.

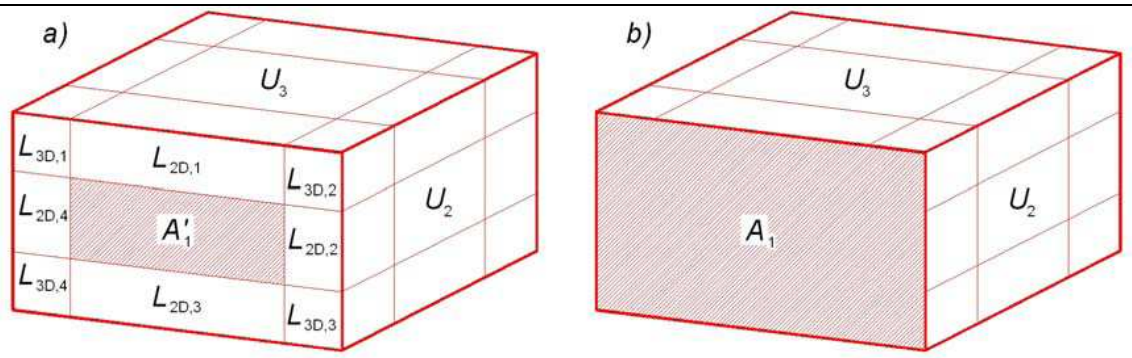



Figura 2.7. Individuazione della superficie di parete interessata da scambi termici monodimensionali rispettivamente secondo il calcolo in equazione 7 (immagine *a*) e in equazione 8 (immagine *b*).

Tra il coefficiente di accoppiamento termico bidimensionale $L_{2D,m}$ e la trasmittanza termica lineare $\psi_m$ esiste una relazione, così come tra il coefficiente di accoppiamento termico tridimensionale $L_{3D,n}$ e la trasmittanza termica puntuale $\chi_n$, espressa secondo le equazioni seguenti:

$$\psi_m = L_{2D,m} - \sum_{z=1}^{Nz} U_z \cdot d_{\min,z} \tag{2.9}$$

$$\chi_n = L_{3D,n} - \sum_{u=1}^{Nu} U_u \cdot A''_u - \sum_{v=1}^{Nv} \psi_v \cdot l_v \tag{2.10}$$

dove $d_{\min,z}$ [m] è la distanza minima dal nodo oltre la quale è consentito assumere un flusso termico monodimensionale; $U_z$ è la trasmittanza termica delle pareti correnti adiacenti il ponte termico bidimensionale [W/(m$^2$ K)]; $A_u$ [m$^2$] è l'area delle pareti correnti adiacenti il ponte termico tridimensionale e $U_u$ è la loro trasmittanza termica [W/(m$^2$ K)]; $\psi_v$ [W/(m K)] è la trasmittanza termica lineare dei ponti termici lineari adiacenti al ponte termico tridimensionale e $l_v$ [m] è la lunghezza degli stessi (figura 2.8).

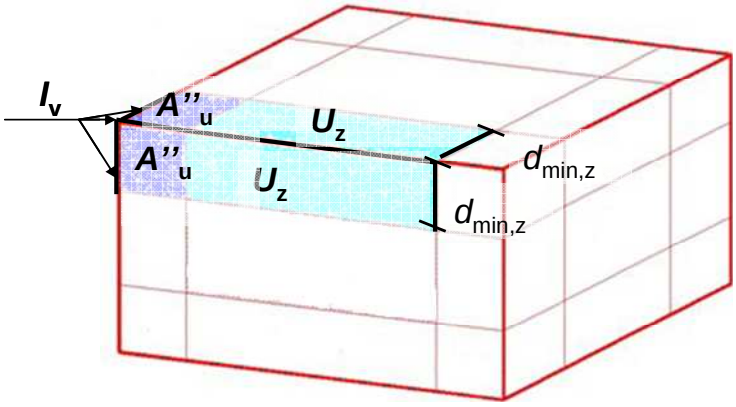



Figura 2.8. Individuazione delle grandezze presenti all'interno delle equazioni 2.9 e 2.10.

La trasmittanza termica lineare pertanto si ottiene sottraendo al coefficiente di accoppiamento termico bidimensionale ($L_{2D,m}$) ovvero il flusso termico totale scambiato in prossimità del nodo per unità di lunghezza del ponte termico e per una differenza di temperatura unitaria, la sola quota monodimensionale (per unità di lunghezza del ponte termico e per una differenza di temperatura unitaria ($U_k \cdot d_{min,k}$)) che interessa ciascun elemento piano di parete. Si ottiene in questo modo l'incremento di flusso termico rispetto a quello calcolato nell'ipotesi di flusso termico monodimensionale dovuto alla presenza del ponte termico.

La trasmittanza termica puntuale si ottiene invece sottraendo al coefficiente di accoppiamento termico tridimensionale ($L_{3D,n}$), ovvero il flusso termico totale scambiato in prossimità del ponte termico puntuale per una differenza di temperatura unitaria, la quota di flusso termico monodimensionale (per una differenza di temperatura unitaria ($U_k \cdot A_k$)) che interessa ciascun elemento piano di parete e la quota di flusso termico addizionale dovuta alla presenza di ponti termici lineari ($\psi_m \cdot l_m$). Si ottiene in questo modo il solo effetto aggiuntivo dovuto al ponte termico puntuale.

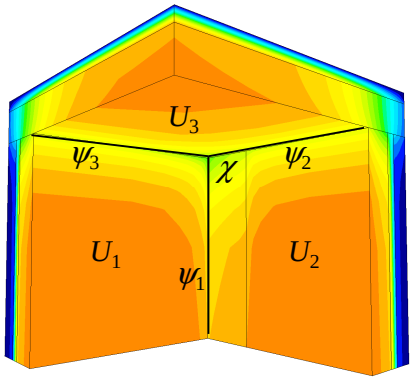



Figura 2.9. Esempio di ponte termico puntuale. (Fonte immagine: TRISCO).

Per il calcolo di $\psi_m$ e di $\chi_n$ bisogna pertanto calcolare rispettivamente $L_{2D,m}$ e $L_{3D,n}$ attraverso modelli di calcolo complessi che solitamente sono implementati all'interno di codici di calcolo dedicati.

In ogni caso, per individuare quella parte di involucro interessata dagli scambi termici bidimensionali o tridimensionali e quindi calcolare $L_{2D,m}$ e $L_{3D,n}$, occorre delimitare correttamente il modello geometrico bidimensionale o tridimensionale.

La creazione del modello geometrico deve rispettare le regole definite dalla norma UNI EN ISO 10211. La distanza minima dal nodo oltre la quale è consentito assumere un flusso termico monodimensionale ($d_{min}$) è pari al valore maggiore tra 1 m e tre volte lo spessore dell'elemento laterale considerato secondo quanto riportato in figura 2.10. Secondo le specifiche, il ponte termico deve essere delimitato da piani di taglio posizionati in prossimità di un piano di simmetria, se questo dista meno di $d_{min}$; ad almeno $d_{min}$ se non ci sono piani di simmetria più vicini,

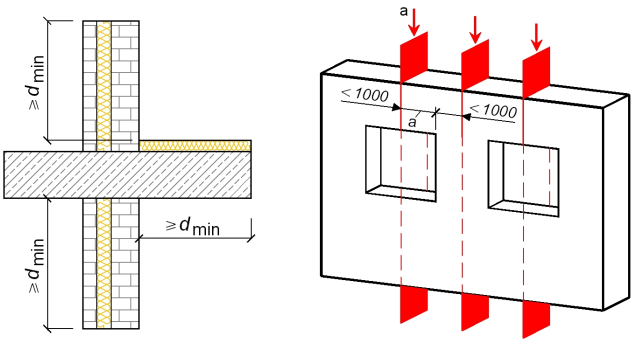



Figura 2.10. Ponti termici delimitati da piani di taglio in corrispondenza di $d_{min}$ (sinistra) e in corrispondenza di piani di simmetria (destra). (Fonte UNI EN ISO 10211).

Al fine di calcolare il flusso termico che attraversa il ponte termico, occorre inoltre suddividere il ponte termico stesso in piani ausiliari[2] in numero tale da rispettare almeno uno dei due criteri:

- raddoppiando il numero di suddivisioni dell'elemento, il flusso termico calcolato che lo attraversa non differisce più dell'1%,
- raddoppiando il numero di suddivisioni il fattore di temperatura sulla superficie interna, $f_{Rsi}$[3] non differisce più di 0,005.

Indicativamente, il ponte termico può essere suddiviso in modo tale che i piani ausiliari siano più vicini in prossimità dell'elemento centrale e sempre più lontani gli uni dagli altri in corrispondenza dei piani di taglio come riportato in figura 2.11.

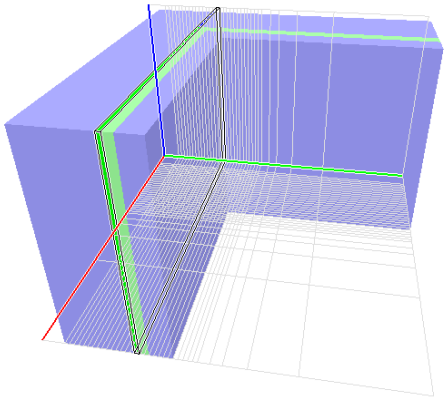


Figura 2.11. Suddivisione del modello geometrico secondo piani di taglio (che delimitano il modello) e in piani ausiliari (che dividono il modello in celle) (Fonte: TRISCO).

[2] I piani ausiliari sono definiti dalla UNI EN ISO 10211 come piani che in aggiunta ai piani costruttivi, dividono il modello geometrico in un numero di celle.

[3] Il fattore di temperatura $f_{R,si}$ equivale alla differenza tra la temperature della superficie interna e dell'aria esterna, diviso per la differenza tra la temperature dell'aria interna e dell'aria esterna calcolata con una resistenza superficiale interna $R_{si}$.

$$f_{R,si} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

Il calcolo è effettuato secondo la norma UNI EN ISO 13788 e, per strutture complesse, secondo la UNI EN ISO 10211.

In questo modo il modello è suddiviso in un numero di celle ognuna delle quali è delimitata da punti (nodi). Operando in condizioni stazionarie, di ogni punto è possibile conoscere la temperatura applicando le leggi di conservazione dell'energia

$$\text{div } \vec{q} = 0 \tag{2.11}$$

e di Fourier

$$\vec{q} = -\lambda \text{ grad } \theta \tag{2.12}$$

introducendo le opportune condizioni al contorno. In questo modo si ottiene un sistema di equazioni che è funzione delle temperature dei nodi.

Dalla soluzione di questo sistema con una delle tecniche conosciute, siano esse iterative o dirette, si ottengono le temperature dei nodi e si può quindi determinare il campo di temperatura. A partire dalla distribuzione di temperatura si calcolano quindi i flussi termici, utilizzando la legge di Fourier.

### *2.3.2 Gli studi a livello nazionale e internazionale*

La valutazione delle dispersioni di calore attraverso i ponti termici è argomento fortemente dibattuto a livello nazionale e internazionale. L'interesse per tale argomento è dovuto principalmente all'incidenza che i ponti termici hanno sul fabbisogno energetico degli edifici, in climi più o meno rigidi. Dal rapporto ASIEPI (*ASsessment and Improvement of the EPBD Impact*), emerge come le problematiche relative ai ponti termici siano tuttora argomento importante in tutta Europa dal momento che l'impatto dei ponti termici sul fabbisogno termico degli edifici in periodo di riscaldamento è mediamente superiore al 30%. D'altra parte tale problematica spesso non viene risolta dai singoli stati che, a livello legislativo e normativo, non fissano requisiti minimi né controllano la qualità costruttiva dei dettagli tecnici. Inoltre uno studio condotto nel 2011 volto all'analisi di edifici in climi mediterranei dimostra che alcune soluzioni di correzione dei ponti termici adottate in edifici del tipo a schiera e a corte, sebbene siano garanzia di riduzione dei consumi (21% di riduzione sul fabbisogno di energia primaria in periodo invernale), non si rivelino essere economicamente convenienti, essendo il periodo di ritorno dell'investimento previsto variabile da oltre 25 anni fino ad un periodo di tempo che supera la vita utile dell'edificio (Evola et al, 2011).

Gli studi scientifici a livello internazione sono rivolti a diversi ambiti di indagine: da un lato alcuni studi hanno come obiettivo quello di indagare il comportamento termico di un componente/nodo strutturale interessato da scambi termici multidimensionali al fine di ottimizzare la scelta tecnologica; dall'altro lato altri studi indagano l'incidenza degli scambi termici multidimensionali sul fabbisogno di energia termica e primaria degli edifici sia in regime stazionario che dinamico; altri ancora hanno l'obiettivo di sviluppare codici di calcolo o modelli per il calcolo dei flussi termici a supporto dei codici di simulazione attualmente in commercio.

Per quanto riguarda l'analisi delle dispersioni di calore di componenti tecnologici, Kosny e Christian (Kosny e Christian, 1995) utilizzano un codice di calcolo sviluppato dallo *Oak Ridge National*

*Laboratory* che opera alle differenze finite al fine di calcolare il flusso termico multidimensionale attraverso una parete con struttura a telaio in metallo. Viene pertanto calcolata una resistenza termica equivalente aggiuntiva capace di tenere conto degli scambi termici multidimensionali attraverso la quale diverse soluzioni progettuali sono state esaminate al fine di massimizzarne il valore rispetto al caso base.

Altri studi sono condotti al fine di individuare soluzioni tecnologiche tali da minimizzare gli scambi termici attraverso i ponti termici: Ben-Nakhi (Ben-Nakhi, 2002) sviluppa un studio volto ad ottimizzare il giunto parete – telaio al fine di ridurre il carico termico in periodo estivo; lo stesso giunto caratterizzato da diverse soluzioni correttive viene indagato da Cappelletti et al. (Cappelletti et al, 2011) fine di individuare la soluzione tecnologica che minimizzi le dispersioni termiche in periodo invernale; Ghazi Wakili et al. (Ghazi Wakili et al, 2007) valutano il comportamento di un elemento isolante posto in prossimità del giunto parete – innesto del solaio del balcone al fine di ridurre le dispersioni termiche rispetto al caso privo di taglio termico; Theodosiou e Papadopoulos (Theodosiou e Papadopoulos, 2008) valutano l'incidenza dei ponti termici per alcune tipologie rappresentative di edifici localizzati in Grecia e caratterizzati da pareti in laterizio con intercapedine e da diverse soluzioni tecnologiche per la soluzione dei nodi strutturali; Zalewsky et al. (Zalewsky et al, 2010) valutano i flussi termici tridimensionali che si instaurano all'interno di un elemento di parete prefabbricata con struttura intelaiata in metallo attraverso indagini sperimentali e simulazioni numeriche; infine Evola et al., già precedentemente citati, (Evola et al, 2011) analizzano due tipologie edilizie caratteristiche del clima mediterraneo e presentano soluzioni tecnologiche per la correzione dei ponti termici individuati.

I metodi di calcolo utilizzati per la valutazione dei flussi termici multidimensionali sono di diversa natura: metodi di calcoli complessi alle differenze finite/ elementi finiti/ volumi finiti in regime stazionario e metodi in regime dinamico.

Dal 1997 iniziano ad essere pubblicati studi volti alla caratterizzazione dei ponti termici in regime dinamico. Mao e Johannesson (Mao e Johannesson, 1997) propongono il calcolo del flusso termico bidimensionale in regime dinamico attraverso il *frequency response method* che permette, una volta suddiviso il ponte termico in singoli elementini, di correlare la temperatura di ogni elementino con l'ampiezza e la fase della variazione della temperatura stessa.

Dal 2002 iniziano ad essere pubblicati lavori volti all'implementazione di metodi numerici per il calcolo di flussi termici bi e tri-dimensionali in regime dinamico all'interno dei codici per la simulazione dinamica degli edifici.

Infatti, la maggior parte dei software di simulazione dinamica maggiormente utilizzati (DOE-2, BLAST, Energy Plus, ESP-r) non permettono di considerare le dispersioni multidimensionali attraverso l'involucro edilizio. Questo porta a compiere notevoli errori in particolare quando si valutano edifici con elevata inerzia termica ed elevati scambi termici multidimensionali attraverso l'involucro.

Kòsny e Kossecka (Kòsny e Kossecka, 2002) presentano un metodo per l'accoppiamento di modelli per il calcolo di flussi termici bi e tridimensionali con codici di calcolo per la simulazione dinamica degli edifici.

Tale metodo consiste nell'inserimento quale dato di input dei codici di simulazione dinamica di pareti con resistenze termiche equivalenti che tengano conto degli effetti di distorsione del campo termico.

Déqué et al. (Déqué et al, 2001) modellano il flusso termico attraverso i ponti termici mediante un codice basato sul modello ai volumi finiti che opera in regime dinamico (Sisley) e implementano tale metodo di analisi all'interno del software di simulazione dinamico Clim 2000. Al fine di semplificare il modello generato da codice di calcolo Sisley e quindi di eliminarne le parti superflue, le equazioni vengono ridotte attraverso il metodo di Moore.

Il problema della riduzione del modello di calcolo complesso di scambio termico attraverso i ponti termici finalizzato all'implementazione in modelli di simulazione dinamica viene inoltre affrontato da Gao et al. (Gao et al, 2008) Questa volta il software di simulazione dinamico preso in considerazione è TRNSYS.

Lo stesso obiettivo viene condotto da Ben-Nakhi (Ben-Nakhi, 2002) utilizzando quale codice dinamico ESP-r.

Un'analisi critica dei precedenti lavori il cui obiettivo è implementare modelli per il calcolo del flusso termico multidimensionale in regime dinamico è condotta da Mattin et al. nel 2011.

Il lavoro analizza le problematiche relative allo studio della trasmissione di calore attraverso i ponti termici in regime dinamico. A tal fine vengono confrontati diversi modelli per due differenti tipologie di ponte termico: il primo caratterizzato da un'inerzia termica simile a quella dell'involucro e la seconda con una bassa inerzia. Da un'analisi dei risultati emerge che non esiste alcun modello che possa rappresentare il comportamento dinamico di un nodo senza prescindere dall'inerzia termica del nodo stesso essendone il comportamento dinamico del ponte termico fortemente influenzato.

Lo studio dettagliato dei ponti termici risulta possibile qualora si utilizzino software di simulazione che eseguono calcoli complessi; in molti casi, però, vi è la necessità di individuare procedure semplificate e veloci da utilizzare qualora il livello di accuratezza dell'analisi sia inferiore.

In letteratura, oltre agli atlanti che sono stati trattati all'interno del paragrafo 2.2.3 si trova uno studio condotto da Dilmac et al. (Dilmac et al, 2007) il cui obiettivo è l'individuazione di un metodo di calcolo semplificato per il calcolo dei flussi termici attraverso la giunzione solaio interpiano – parete e il confronto di tale metodo con i metodi semplificati proposti dalle norme EN 832, EN ISO 13789 e EN ISO 14683 nonché con i risultati ottenuti da un'analisi più accurata che prevede il calcolo dei flussi termici bidimensionali. Attraverso un'analisi agli elementi finiti, l'intera area della trave in prossimità della giunzione tra solaio interpiano e parete viene suddivisa in tre parti ognuna caratterizzata da una diversa densità di flusso termico. Il flusso termico totale viene pertanto ricavato attraverso una somma dei flussi termici di ogni singola area pesata sulle rispettive aree. Diverse

soluzioni sono valutate (senza isolamento termico, con isolamento termico interno, in intercapedine e sul lato esterno).

Uno studio che ha fortemente influenzato il presente lavoro di ricerca è svolto da Ben Larbi (Ben Larbi, 2005). Lo studio ha come obiettivo quello di trovare, per alcune tipologie di ponte termico, un'equazione di regressione che leghi alcune variabili di input alla variabile di output ($\psi$) attraverso modelli statistici di tipo *gray box*. Da principio sono svolte alcune simulazioni con modelli alle differenze finite al variare di alcuni parametri progettuali e quindi sono elaborate equazioni di regressione la cui forma generale non è puramente di tipo statistico ma rappresenta il modello fisico di scambio termico attraverso il ponte termico. Questo lavoro è alla base dello studio svolto che viene presentato nel paragrafo 2.6.

## 2.4 Analisi parametrica

La metodologia per il calcolo dettagliato della trasmittanza termica lineare conforme alla norma UNI EN ISO 10211 è stata applicata a 94 ponti termici al fine di redigere un "atlante di ponti termici" che fornisse i valori di $\psi$ al variare dei principali parametri progettuali.

La scelta delle tipologie di ponte termico da analizzare è stata effettuata a seguito di un'approfondita analisi bibliografica, con particolare riferimento alla normativa tecnica (UNI EN ISO 14683), agli atlanti esistenti (*Catalogue des ponts thermiques*, RULES Th – K77), attingendo in alcuni casi da norme non più in vigore (UNI 7357) e alla letteratura di settore.

In tabella 2.1 sono indicate le tipologie di ponte termico analizzate ed i rispettivi codici identificativi attribuiti.

Tabella 2.1. Categorie di ponte termico analizzate e relativi codici identificativi

| Tipologia | Primo elemento | Secondo elemento | CODICE |
|---|---|---|---|
| Intersezione | Chiusura verticale esterna (parete) | Copertura | R |
| | Chiusura verticale esterna (parete) | Balcone | B |
| | Chiusura verticale esterna (pareti) | Chiusura verticale esterna (pareti) | C |
| | Chiusura verticale esterna (parete) | Solaio interpiano | IF |
| | Chiusura verticale esterna (parete) | Divisorio verticale interno (parete interna) | IW |
| | Chiusura verticale esterna (parete) | Solaio controterra | GF |
| | Chiusura verticale esterna (parete) | Solaio del piano rialzato | GF |
| | Chiusura | Pilastro | P |
| | Chiusura | Telaio di un serramento | W |

Per ogni tipologia, al pari della norma UNI EN ISO 14683, sono state considerate diverse sottocategorie di nodo in funzione della diversa disposizione dell'isolamento termico a parete (isolamento esterno, in intercapedine, interno, isolamento distribuito) e di diverse soluzioni progettuali per la correzione del ponte termico.

In tabella 2.2 è indicato l'elenco completo di tutti i ponti termici individuati ed analizzati.

Tabella 2.2. Elenco dei ponti termici analizzati e relativi codici identificativi

| CODICE | DESCRIZIONE |
|---|---|
| **R** | **Giunto parete - copertura** |
| R1 | Giunto parete con isolamento esterno – copertura |
| R2 | Giunto parete con isolamento in intercapedine – copertura |
| R3 | Giunto parete con isolamento interno – copertura |
| R4 | Giunto parete con isolamento ripartito – copertura |
| R5 | Giunto parete sporgente con isolamento – copertura (verso ambiente esterno e verso ambiente non climatizzato con $b_{tr}$ = 0,50-0,65-0,80) |
| R6 | Giunto parete sporgente con isolamento in intercapedine – copertura (verso ambiente esterno e verso ambiente non climatizzato con $b_{tr}$ = 0,50-0,65-0,80) |
| R7 | Giunto parete sporgente con isolamento interno – copertura (verso ambiente esterno e verso ambiente non climatizzato con $b_{tr}$ = 0,50-0,65-0,80) |
| R9 | Giunto parete con isolamento esterno continuo – copertura |
| R12 | Giunto parete con isolamento ripartito – copertura con correzione (verso ambiente esterno e verso ambiente non climatizzato con $b_{tr}$ = 0,50-0,65-0,80) |
| **B** | **Giunto parete - balcone** |
| B1 | Giunto parete con isolamento esterno - balcone |
| B2 | Giunto parete con isolamento in intercapedine – balcone |
| B3 | Giunto parete con isolamento interno – balcone |
| B4 | Giunto parete con isolamento ripartito – balcone |
| **C** | **Angolo tra pareti** |
| C1 | Giunto tre due pareti con isolamento esterno (sporgente) |
| C2 | Giunto tre due pareti con isolamento in intercapedine (sporgente) |
| C3 | Giunto tre due pareti con isolamento interno (sporgente) |
| C4 | Giunto tre due pareti con isolamento ripartito (sporgente) |
| C5 | Giunto tre due pareti con isolamento esterno (rientrante) |
| C6 | Giunto tre due pareti con isolamento in intercapedine (rientrante) |
| C7 | Giunto tre due pareti con isolamento interno (rientrante) |
| C8 | Giunto tre due pareti con isolamento ripartito (rientrante) |
| C9 | Giunto tra due pareti con isolamento interno con pilastro non isolato (sporgente) |
| C10 | Giunto tre due pareti con isolamento in intercapedine con pilastro non isolato (sporgente) |
| C11 | Giunto tre due pareti con isolamento in intercapedine con pilastro isolato (sporgente sol. 1) |
| C12 | Giunto tre due pareti con isolamento in intercapedine con pilastro isolato (sporgente sol. 2) |
| C13 | Giunto tra due pareti con isolamento esterno con pilastro non isolato (sporgente) |
| C14 | Giunto tra due pareti con isolamento esterno continuo con pilastro isolato (sporgente) |
| C15 | Giunto tra due pareti con isolamento ripartito con pilastro non isolato (sporgente) |
| C16 | Giunto tra due pareti con isolamento ripartito con pilastro isolato (sporgente) |
| C17 | Giunto tra due pareti con isolamento esterno con pilastro non isolato (rientrante) |
| C18 | Giunto tra due pareti con isolamento in intercapedine con pilastro non isolato (rientrante) |
| C19 | Giunto tra due pareti con isolamento in intercapedine con pilastro isolato (rientrante sol 1) |
| C20 | Giunto tra due pareti con isolamento in intercapedine con pilastro isolato (rientrante sol 2) |
| C21 | Giunto tra due pareti con isolamento interno con pilastro non isolato (rientrante) |
| C22 | Giunto tra due pareti con isolamento interno continuo con pilastro isolato (rientrante) |
| C23 | Giunto tra due pareti con isolamento ripartito con pilastro non isolato (rientrante) |
| C24 | Giunto tra due pareti con isolamento ripartito con pilastro isolato (rientrante) |
| **IF** | **Giunto parete – solaio interpiano** |
| IF1 | Giunto parete con isolamento esterno continuo – solaio interpiano |
| IF2 | Giunto parete con isolamento in intercapedine – solaio interpiano |
| IF3 | Giunto parete con isolamento interno – solaio interpiano senza correzione |
| IF4 | Giunto parete con isolamento ripartito – solaio interpiano |
| IF5 | Giunto parete con isolamento in intercapedine – solaio interpiano con correzione |
| IF7 | Giunto parete con isolamento interno – solaio interpiano con correzione |
| **IW** | **Giunto parete – parete interna** |
| IW1 | Giunto parete con isolamento esterno continuo – parete interna |
| IW3 | Giunto parete con isolamento interno – parete interna |

| CODICE | DESCRIZIONE |
|---|---|
| IW4 | Giunto parete con isolamento ripartito – parete interna |
| **GF** | **Giunto parete – solaio controterra** |
| GF1 | Giunto parete con isolamento esterno – solaio controterra con isolamento all'intradosso (con *B'* = 2,0-6,0-10,0 m) |
| GF2 | Giunto parete con isolamento in intercapedine – solaio controterra con isolamento all'intradosso (con *B'* = 2,0-6,0-10,0 m) |
| GF4a | Giunto parete con isolamento ripartito – solaio controterra con isolamento all'intradosso e $\lambda_{M2}$ = 0,90 W/(m K) (con *B'* = 2,0-6,0-10,0 m) |
| GF4b | Giunto parete con isolamento ripartito – solaio controterra con isolamento all'intradosso e $\lambda_{M2}$ = 2,0 W/(m K) (con *B'* = 2,0-6,0-10,0 m) |
| GF5 | Giunto parete con isolamento esterno – solaio controterra con isolamento all'estradosso (con *B'* = 2,0-6,0-10,0 m) |
| GF6 | Giunto parete con isolamento in intercapedine –solaio controterra con isolamento all'estradosso (con *B'* = 2,0-6,0-10,0 m) |
| GF8a | Giunto parete con isolamento ripartito –solaio controterra con isolamento all'estradosso e $\lambda_{M2}$ = 0,90 W/(m K) (con *B'* = 2,0-6,0-10,0 m) |
| GF8b | Giunto parete con isolamento ripartito –solaio controterra con isolamento all'estradosso e $\lambda_{M2}$ = 2,0 W/(m K) (con *B'* = 2,0-6,0-10,0 m) |
| **GF** | **Giunto parete – solaio rialzato** |
| GF9a | Giunto parete con isolamento esterno – solaio rialzato con isolamento all'intradosso (verso ambiente esterno e verso ambiente non climatizzato con $b_{tr}$ = 0,50-0,65-0,80) |
| GF9b | Giunto parete con isolamento esterno continuo – solaio rialzato con isolamento all'intradosso (verso ambiente esterno e verso ambiente non climatizzato con $b_{tr}$ = 0,50-0,65-0,80) |
| GF10 | Giunto parete con isolamento in intercapedine – solaio rialzato con isolamento all'intradosso (verso ambiente esterno e verso ambiente non climatizzato con $b_{tr}$ = 0,50-0,65-0,80) |
| GF11 | Giunto parete con isolamento interno – solaio rialzato con isolamento all'intradosso (verso ambiente esterno e verso ambiente non climatizzato con $b_{tr}$ = 0,50-0,65-0,80) |
| GF12a | Giunto parete con isolamento ripartito – solaio rialzato con isolamento all'intradosso e $\lambda_{M2}$ = 0,25 W/(m K) (verso ambiente esterno e verso ambiente non climatizzato con $b_{tr}$ = 0,50-0,65-0,80) |
| GF12b | Giunto parete con isolamento ripartito – solaio rialzato con isolamento all'intradosso e $\lambda_{M2}$ = 0,90 W/(m K) (verso ambiente esterno e verso ambiente non climatizzato con $b_{tr}$ = 0,50-0,65-0,80) |
| GF13a | Giunto parete con isolamento esterno – solaio rialzato con isolamento all'estradosso (verso ambiente esterno e verso ambiente non climatizzato con $b_{tr}$ = 0,50-0,65-0,80) |
| GF13b | Giunto parete con isolamento esterno continuo – solaio rialzato con isolamento all'estradosso (verso ambiente esterno e verso ambiente non climatizzato con $b_{tr}$ = 0,50-0,65-0,80) |
| GF14 | Giunto parete con isolamento in intercapedine – solaio rialzato con isolamento all'intradosso (verso ambiente esterno e verso ambiente non climatizzato con $b_{tr}$ = 0,50-0,65-0,80) |
| GF16 | Giunto parete con isolamento ripartito – solaio rialzato con isolamento all'intradosso (verso ambiente esterno e verso ambiente non climatizzato con $b_{tr}$ = 0,50-0,65-0,80) |
| **P** | **Giunto parete - pilastro** |
| P1 | Giunto parete con isolamento esterno – pilastro non isolato |
| P2 | Giunto parete con isolamento in intercapedine – pilastro non isolato |
| P3 | Giunto parete con isolamento interno – pilastro non isolato |
| P4 | Giunto parete con isolamento ripartito – pilastro non isolato |
| P5 | Giunto parete con isolamento esterno – pilastro con isolamento esterno |
| P6 | Giunto parete con isolamento interno – pilastro con isolamento interno |
| P7 | Giunto parete con isolamento in intercapedine – pilastro con isolamento esterno (sol 1) |
| P8 | Giunto parete con isolamento in intercapedine – pilastro con isolamento interno (sol 1) |
| P9 | Giunto parete con isolamento in intercapedine – pilastro con isolamento esterno (sol 2) |
| P10 | Giunto parete con isolamento in intercapedine – pilastro con isolamento interno (sol 2) |
| P11 | Giunto parete con isolamento ripartito – pilastro con isolamento esterno |
| P12 | Giunto parete con isolamento ripartito – pilastro con isolamento interno |
| **W** | **Giunto parete - telaio** |
| W1 | Giunto parete con isolamento esterno – telaio posto a filo esterno |
| W2 | Giunto parete con isolamento in intercapedine interrotto – telaio posto a filo esterno |

| CODICE | DESCRIZIONE |
|---|---|
| W3 | Giunto parete con isolamento interno interrotto in corrispondenza dello stipite– telaio posto a filo esterno |
| W4 | Giunto parete con isolamento ripartito – telaio posto a filo esterno |
| W5 | Giunto parete con isolamento in intercapedine continuo– telaio posto a filo esterno |
| W6 | Giunto parete con isolamento interno continuo – telaio posto a filo esterno |
| W7 | Giunto parete con isolamento esterno – telaio posto in mezzeria |
| W8 | Giunto parete con isolamento in intercapedine interrotto – telaio posto in mezzeria |
| W9 | Giunto parete con isolamento interno interrotto in corrispondenza dello stipite – telaio posto in mezzeria |
| W10 | Giunto parete con isolamento ripartito – telaio posto in mezzeria |
| W11 | Giunto parete con isolamento in intercapedine continuo – telaio posto in mezzeria |
| W12 | Giunto parete con isolamento interno continuo – telaio posto in mezzeria |
| W13 | Giunto parete con isolamento esterno interrotto in corrispondenza dello stipite – telaio posto a filo interno |
| W14 | Giunto parete con isolamento in intercapedine interrotto – telaio posto a filo interno |
| W15 | Giunto parete con isolamento interno – telaio posto a filo interno |
| W16 | Giunto parete con isolamento ripartito – telaio posto a filo interno |
| W17 | Giunto parete con isolamento in intercapedine – telaio posto a filo interno |
| W18 | Giunto parete con isolamento esterno continuo – telaio posto a filo interno |

Per ogni ponte termico sono stati quindi valutati i valori di trasmittanza termica lineare in funzione dei parametri di ingresso che maggiormente ne influenzano il valore (variabili per ogni ponte termico), considerando per ognuno di essi un campo di variazione secondo un passo discreto tale da ricoprire la maggior parte delle attuali soluzioni progettuali dell'involucro edilizio.

I parametri variabili sono stati selezionati sulla base delle seguenti considerazioni:

- parametri che progettualmente possono variare notevolmente. È il caso del laterizio la cui tipologia (pieno, forato, leggero) è caratterizzata da diversi valori di resistenza termica. Per queste grandezze sono stati pertanto identificati *set* rappresentativi di valori. Al contrario, i materiali isolanti sono caratterizzati da una conducibilità termica mediamente piuttosto bassa la cui variazione risulta incidere poco sul calcolo della $\psi$;
- parametri che influenzano maggiormente la variazione di $\psi$. Al fine di individuare quali parametri progettuali incidono maggiormente sul valore di $\psi$, sono state condotte diverse simulazioni per tutte le tipologie di ponte termico in esame. Da tali simulazioni è emerso ad esempio come ad incidere sul valore dell'*output* non fosse il solo parametro aggregato "trasmittanza termica dell'involucro", bensì i singoli parametri "spessore" e "conducibilità termica". Ovvero, al pari di trasmittanza termica dell'involucro, i valori di $\psi$ variano al variare di diversi valori di spessore di parete e di conducibilità termica della stessa.

Se in generale queste considerazioni sussistono, i parametri sono considerati come variabili, altrimenti rientrano tra i parametri fissi (figura 2.12).

Il numero notevole di casi analizzati nonché il proposito di rendere l'atlante implementabile ha introdotto però alcune limitazioni nel numero di simulazioni per ponte termico e pertanto alcune semplificazioni. La principale di queste consiste nella scelta di adottare quale parametro la trasmittanza media dell'involucro e non le singole trasmittanze dell'elemento tecnico variabili

separatamente. Questa scelta è però motivata da considerazioni di carattere progettuale: in caso di valutazione su edificio di nuova costruzione, i vincoli legislativi introdotti sulle trasmittanze termiche dei singoli elementi, non differiscono in maniera notevole al variare dell'elemento tecnico, pertanto è verosimile ipotizzare un livello di isolamento medio per l'intero involucro disperdente; in caso di riqualificazione sull'esistente, sono presenti casi di ponte termico con isolamento termico presente solo su un elemento tecnico con conseguenti valori di trasmittanza termica diversi.

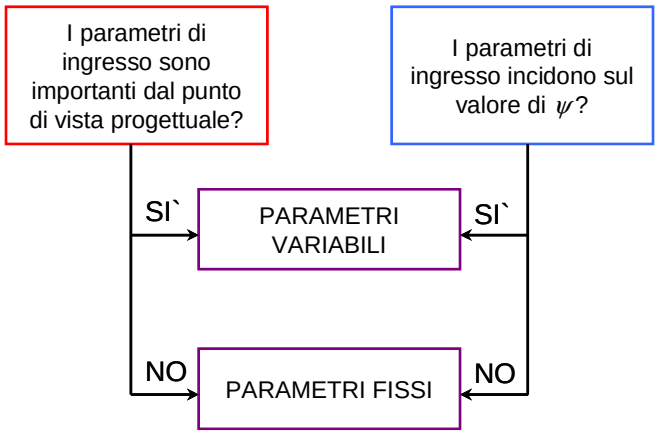



Figura 2.12. *Flow chart* sulla modalità di scelta dei parametri per le analisi parametriche

Nelle tabelle seguenti (tabella 2.3 e tabella 2.4) sono indicati i parametri di ingresso nonché le condizioni al contorno che sono stati considerati assegnati e fissi, per tutti i ponti termici analizzati, mentre all'interno della tabella 2.5 sono indicati, per ogni categoria di ponte termico, i parametri variabili.

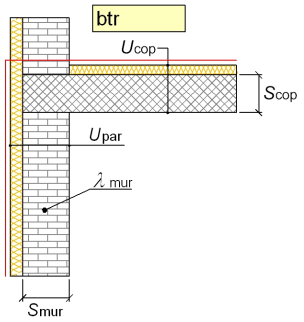
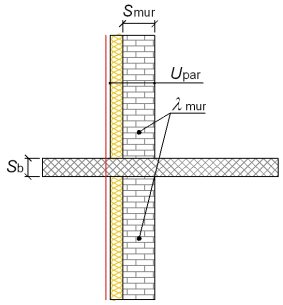
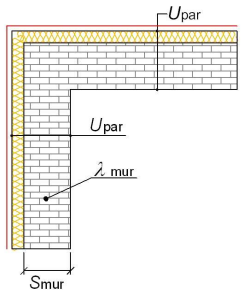
Tabella 2.3. Dati di ingresso fissi utilizzati per i calcoli di $\psi$

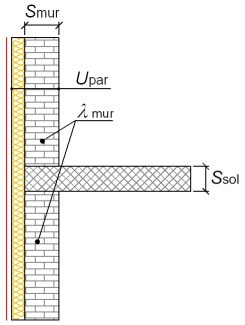
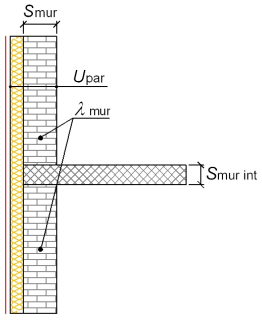
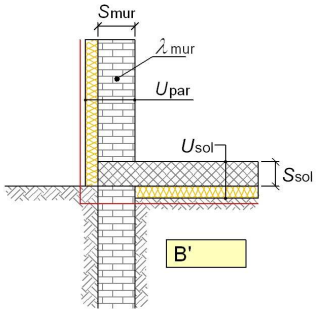
| **Dati di ingresso** | | |
|---|---|---|
| Conduttività termica dell'isolante | 0,04 | [W/(m·K)] |
| Conduttività termica del calcestruzzo | 2,0 | [W/(m·K)] |
| Conduttività termica del terreno | 2,0 | [W/(m·K)] |
| Trasmittanza del telaio del serramento | 2,0 | [W/(m$^2$·K)] |
| Spessore del telaio del serramento | 6,0 | [cm] |
| Spessore dell'isolante di correzione | 4,0 | [cm] |

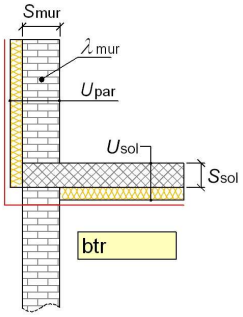
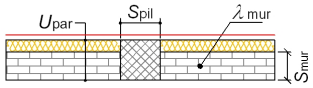
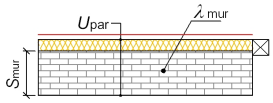
Tabella 2.4. Condizioni al contorno fisse utilizzate per i calcoli di $\psi$

| **Condizioni al contorno** | | |
|---|---|---|
| Resistenza termica superficiale esterna | 0,04 | [(m$^2$K)/W] |
| Resistenza termica superficiale interna | 0,13 | [(m$^2$K)/W] |
| Temperatura interna | 20,0 | [°C] |
| Temperatura esterna | 0 | [°C] |

Tabella 2.5. Variabili progettuali per ogni tipologia di ponte termico analizzato

| Parete - copertura | Parete - balcone | Intersezione tra pareti |
|---|---|---|
| **CODICE R** | **CODICE B** | **CODICE C** |
|  |  |  |
| **Variabili progettuali** | **Variabili progettuali** | **Variabili progettuali** |
| Spessore della copertura (senza isolante termico) $S_{cop}$ cm | Spessore del balcone $S_b$ cm | Spessore della parete (senza isolante termico) $S_{mur}$ cm |
| Spessore della parete (senza isolante termico) $S_{mur}$ cm | Spessore della parete (senza isolante termico) $S_{mur}$ cm | Trasmittanza termica delle pareti $U_{par}$ W/(m$^2$K) |
| Trasmittanza termica della parete $U_{par}$ W/(m$^2$K) | Trasmittanza termica della parete $U_{par}$ W/(m$^2$K) | Conduttività termica della muratura $\lambda_{mur}$ W/(m K) |
| Trasmittanza termica della copertura $U_{cop}$ W/(m$^2$K) | Conduttività termica della muratura $\lambda_{mur}$ W/(m K) | |
| Conduttività termica della muratura $\lambda_{mur}$ W/(m K) | | |
| Fattore di correzione della temperatura $b_{tr}$ [-] | | |

| Parete – solaio interpiano | Parete – parete interna | Parete – solaio controterra |
|---|---|---|
| **CODICE IF** | **CODICE IW** | **CODICE GF** |
|  |  |  |
| **Variabili progettuali** | **Variabili progettuali** | **Variabili progettuali** |
| Spessore del solaio $S_{sol}$ cm | Spessore della parete interna $S_{mur\ int}$ cm | Spessore del solaio $S_{sol}$ cm |
| Spessore della parete (senza isolante termico) $S_{mur}$ cm | Spessore della parete esterna (senza isolante termico) $S_{mur}$ cm | Spessore della parete (senza isolante termico) $S_{mur}$ cm |
| Trasmittanza termica della parete $U_{par}$ W/(m$^2$K) | Trasmittanza termica della parete esterna $U_{par}$ W/(m$^2$K) | Trasmittanza termica della parete $U_{par}$ W/(m$^2$K) |
| Conduttività termica della muratura $\lambda_{mur}$ W/(m K) | Conduttività termica della muratura (interna ed esterna) $\lambda_{mur}$ W/(m K) | Trasmittanza termica del solaio $U_{sol}$ W/(m$^2$K) |
| | | Conduttività termica della muratura $\lambda_{mur}$ W/(m K) |
| | | Dimensione caratteristica del pavimento $B'$ m |

| Parete – solaio rialzato | | | Parete - pilastro | | | Parete - telaio | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **CODICE GF** | | | **CODICE P** | | | **CODICE W** | | |
|  | | |  | | |  | | |
| **Variabili progettuali** | | | **Variabili progettuali** | | | **Variabili progettuali** | | |
| Spessore del solaio | $S_{sol}$ | cm | Spessore del pilastro | $S_{pil}$ | cm | Spessore della parete (senza isolante termico) | $S_{mur}$ | cm |
| Spessore della parete (senza isolante termico) | $S_{mur}$ | cm | Spessore della parete (senza isolante termico) | $S_{mur}$ | cm | Trasmittanza termica della parete | $U_{par}$ | W/(m$^2$K) |
| Trasmittanza termica della parete | $U_{par}$ | W/(m$^2$K) | Trasmittanza termica della parete | $U_{par}$ | W/(m$^2$K) | Conduttività termica della muratura | $\lambda_{mur}$ | W/(m K) |
| Trasmittanza termica del solaio | $U_{sol}$ | W/(m$^2$K) | Conduttività termica della muratura | $\lambda_{mur}$ | W/(m K) | | | |
| Conduttività termica della muratura | $\lambda_{mur}$ | W/(m K) | | | | | | |
| Fattore di correzione della temperatura | $b_{tr}$ | [-] | | | | | | |

Si tenga presente che il passo scelto nelle simulazioni per i parametri di ingresso è sufficientemente piccolo da consentire l'interpolazione lineare per la determinazione del valore di trasmittanza termica lineare per valori delle variabili di ingresso compresi tra quelli utilizzati per le simulazioni.

In tabella 2.6 è indicato il passo scelto per ogni parametro di ingresso.

Tabella 2.6. Indicazione dei valori dei parametri di ingresso variabili scelti per le simulazioni.

| Variabile | Simbolo | Unità di misura | Valori |
|---|---|---|---|
| Spessore solaio interpiano o copertura o balcone | $S_{sol}$=$S_{co}$=$S_b$ | [m] | [0,15 - 0,20 - 0,25] |
| Spessore della parete (senza isolante termico) | $S_{mur}$ | [m] | [0,2 - 0,3 - 0,4] |
| Spessore dei paramenti per pareti ad intercapedine (senza isolante) | $S_{M1}$ – $S_{M2}$ | [m] | [0,2+0,1 – 0,25+0,1 – 0,3+0,1 - 0,1+0,1 – 0,1+0,2 – 0,1+0,25 – 0,1+0,3] |
| Trasmittanza termica solaio o copertura | $U_{sol}$ | [W/(m$^2$K)] | [0,1 – 0,2 – 0,3 – 0,4 - 0,5 – 0,6 - 0,7] |
| Trasmittanza termica della parete | $U_{par}$ | [W/(m$^2$K)] | [0,1 – 0,2 – 0,3 – 0,4 - 0,5 – 0,6 - 0,7] |
| Conduttività termica della muratura | $\lambda_{mur}$ | [W/(m K)] | [0,25 – 0,50 - 0,90] |
| Fattore di correzione della temperatura | $b_{tr}$ | [-] | [0,5 – 0,65 – 0,8 - 0,1] |

| Variabile | Simbolo | Unità di misura | Valori |
|---|---|---|---|
| Dimensione caratteristica del pavimento | *B'* | [m] | [2 – 6 – 10] |
| Spessore pilastro | $S_{pil}$ | [m] | [0,3 – 0,4] |

In generale i parametri scelti sono lo spessore degli elementi tecnici adiacenti il nodo (parete, solaio di copertura, interpiano, di balcone o contro terra), la conducibilità termica degli elementi con bassa resistenza termica che costituiscono le pareti e lo spessore di isolamento termico tale da individuare valori di trasmittanza termica compresi tra 0,7 e 0,1 [W/(m$^2$ K)].

Per quanto riguarda la giunzione copertura – parete esterna e parete – solaio rialzato è stato altresì individuato quale parametro progettuale il fattore $b_{tr}$ di correzione della differenza di temperatura per tenere in considerazione eventuali ambienti non climatizzati (quali sottotetto nel caso del giunto copertura – parete e seminterrato nel caso di giunto solaio rialzato – parete). Tale parametro assume valori compresi tra 1 (in caso la temperatura dell'ambiente adiacente sia uguale alla temperatura esterna) e 0,5 (la temperatura dell'ambiente adiacente sia uguale alla media aritmetica tra la temperatura esterna e quella dell'ambiente riscaldato) ed è calcolato in accordo alla UNI EN ISO 13789. In caso si conosca la temperatura dell'ambiente non climatizzato ($\theta_u$)

$$b_{tr} = \frac{\theta_i - \theta_u}{\theta_i - \theta_e} \tag{2.13}$$

dove $\theta_i$ è la temperatura dell'ambiente interno e $\theta_e$ la temperatura dell'ambiente esterno. In caso invece non si conosca $\theta_u$

$$b_{tr} = \frac{H_{ue}}{H_{iu} + H_{ue}} \tag{2.14}$$

dove $H_{ue}$ è il coefficiente di accoppiamento termico tra ambiente non climatizzato e ambiente esterno e $H_{iu}$ è il coefficiente di accoppiamento termico tra ambiente interno e ambiente non climatizzato.

Nel caso invece della giunzione parete – solaio controterra, si è valutato, oltre a parametri progettuali propri del nodo in questione, la dimensione caratteristica del pavimento *B'* secondo quanto previsto dalla norma UNI EN ISO 13370, essendo i flussi termici bidimensionali relativi al sistema struttura – terreno fortemente dipendenti dalla geometria dell'edificio oggetto di studio. *B'* viene calcolato secondo l'equazione seguente:

$$B' = \frac{A}{0{,}5 \cdot P} \tag{2.15}$$

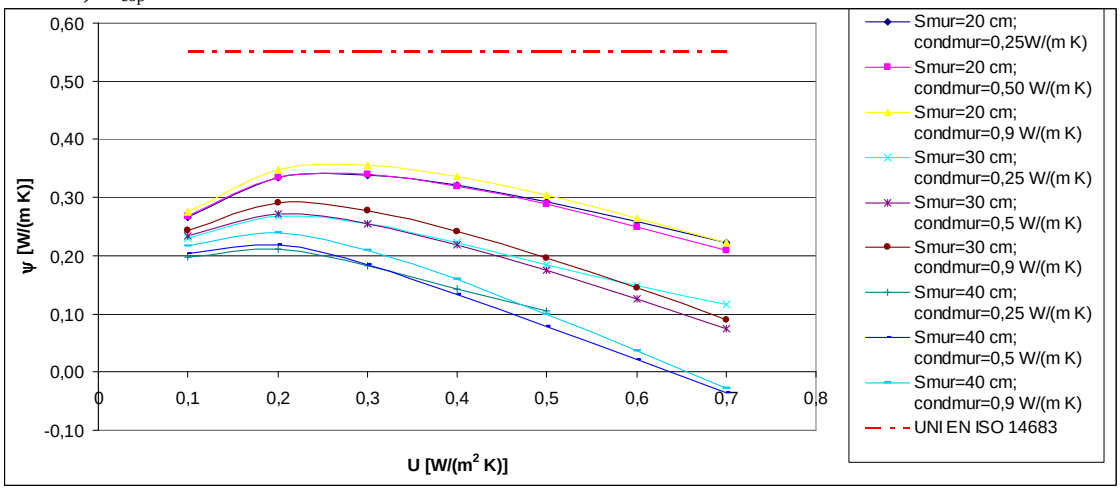
con P [m] pari al perimetro disperdente del pavimento e *A* [m$^2$] pari alla superficie del pavimento.

Considerando i parametri, sia fissi sia variabili, sopra descritti, si è calcolata una media di 190 valori per ogni ponte termico.

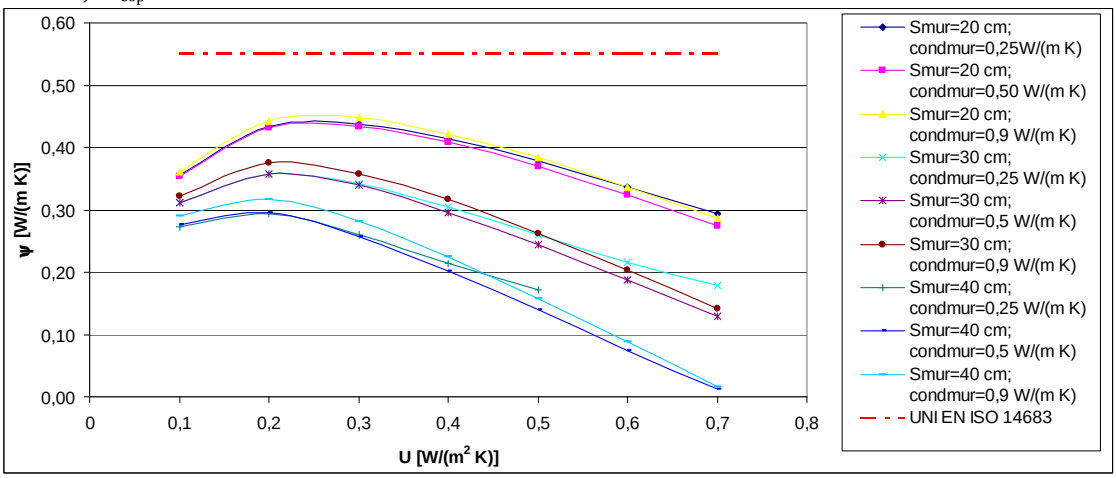
In figura 2.13 è riportata la variazione dei valori di $\psi$ in funzione delle variabili progettuali considerate relativi ad un esempio di ponte termico (R1). Nella stessa figura è indicato il relativo e univoco valore di $\psi$ riportato all'interno della norma UNI EN ISO 14683 (segmento in rosso). Nel caso in esame e nella quasi totalità dei casi esaminati i valori precalcolati della UNI EN ISO 14683 sovrastimano mediamente di oltre il 50% i valori calcolati con procedura analitica.

Al fine di valutare le differenze tra procedure di calcolo si osservi in tabella 2.7 i valori medi e le deviazioni standard dei valori di $\psi$ calcolati in maniera dettagliata e i relativi valori precalcolati.

a) $S_{cop}$ = 15 cm




b) $S_{cop}$ = 20 cm



c) $S_{cop}$ = 25 cm

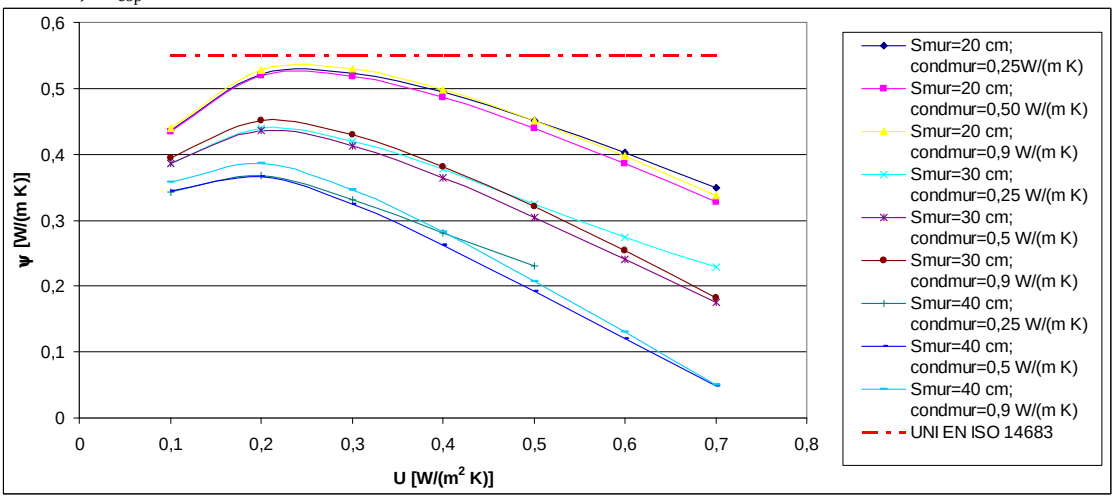



Figura 2.13. Variazione di $\psi$ al variare dei parametri di ingresso per il ponte termico R1

Tabella 2.7. Valori medi e deviazione standard dei valori di $\psi$ calcolati con procedura analitica e confronto con valori precalcolati secondo la UNI EN ISO 14683.

| | ***UNI EN ISO 10211*** | | | | ***UNI EN ISO 14683*** | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **CODICE** | **$\psi_e$ valore min [W/(m·K)]** | **$\psi_e$ valore max [W/(m·K)]** | **$\psi_e$ valore medio [W/(m·K)]** | **$\psi_e$ dev. standard [W/(m·K)]** | **$\psi_e$ [W/(m·K)]** | **$\Delta^*$ [W/(m·K)]** |
| **R** | | | | | | |
| R1 | -0,04 | 0,53 | **0,29** | 0,12 | **0,55** | 0,26 |
| R2 | 0,00 | 0,62 | **0,31** | 0,12 | **0,50** | 0,19 |
| R3 | 0,03 | 0,66 | **0,37** | 0,13 | **0,40** | 0,03 |
| R4 | -0,26 | 0,60 | **0,22** | 0,17 | **0,40** | 0,18 |
| R5 | -0,13 | 0,25 | **0,06** | 0,07 | **0,60** | 0,54 |
| R6 | -0,23 | 0,28 | **0,02** | 0,08 | **0,50** | 0,48 |
| R7 | -0,06 | 0,57 | **0,30** | 0,12 | **0,65** | 0,35 |
| R9 | -0,18 | 0,16 | **-0,07** | 0,05 | **-0,05** | 0,02 |
| R12 | -0,43 | 0,14 | **0,00** | 0,09 | **0,15** | 0,15 |
| **B** | | | | | | |
| B1 | 0,35 | 0,96 | **0,64** | 0,14 | **0,95** | 0,31 |
| B2 | 0,35 | 1,00 | **0,63** | 0,13 | **0,95** | 0,32 |
| B3 | 0,33 | 0,91 | **0,61** | 0,13 | **0,90** | 0,29 |
| B4 | 0,33 | 0,83 | **0,55** | 0,12 | **0,70** | 0,15 |
| **C** | | | | | | |
| C1 | -0,38 | -0,06 | **-0,15** | 0,08 | **-0,05** | 0,10 |
| C2 | -0,47 | -0,08 | **-0,20** | 0,09 | **-0,10** | 0,10 |
| C3 | -0,54 | -0,09 | **-0,25** | 0,11 | **-0,20** | 0,05 |
| C4 | -0,63 | -0,14 | **-0,36** | 0,20 | **-0,15** | 0,21 |
| C5 | 0,02 | 0,12 | **0,04** | 0,02 | **0,05** | 0,01 |
| C6 | 0,04 | 0,30 | **0,11** | 0,05 | **0,15** | 0,04 |
| C7 | 0,05 | 0,30 | **0,14** | 0,06 | **0,15** | 0,01 |
| C8 | 0,05 | 0,25 | **0,14** | 0,08 | **0,10** | -0,04 |
| **IF** | | | | | | |
| IF1 | 0,00 | 0,59 | **0,06** | 0,09 | **0,00** | -0,06 |
| IF2 | 0,34 | 1,05 | **0,64** | 0,14 | **0,95** | 0,31 |
| IF3 | 0,34 | 0,96 | **0,63** | 0,14 | **0,90** | 0,27 |
| IF4 | 0,34 | 0,91 | **0,59** | 0,14 | **0,70** | 0,11 |
| IF5 | 0,19 | 0,68 | **0,40** | 0,11 | **0,60** | 0,20 |

| | *UNI EN ISO 10211* | | | | *UNI EN ISO 14683* | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **CODICE** | **$\psi_e$ valore min [W/(m·K)]** | **$\psi_e$ valore max [W/(m·K)]** | **$\psi_e$ valore medio [W/(m·K)]** | **$\psi_e$ dev. standard [W/(m·K)]** | **$\psi_e$ [W/(m·K)]** | **$\Delta^*$ [W/(m·K)]** |
| IF7 | 0,22 | 0,74 | **0,47** | 0,12 | **0,70** | 0,23 |
| **IW** | | | | | | |
| IW1 | -0,05 | 0,00 | **-0,01** | 0,01 | **0,00** | 0,01 |
| IW3 | -0,01 | 0,45 | **0,16** | 0,12 | **0,90** | 0,74 |
| IW4 | -0,05 | 0,00 | **-0,01** | 0,01 | **0,00** | 0,01 |
| **GF** | | | | | | |
| GF1 | 0,00 | 0,46 | **0,25** | 0,10 | **0,65** | 0,40 |
| GF2 | 0,08 | 0,80 | **0,43** | 0,13 | **0,60** | 0,17 |
| GF4 | -0,14 | 0,77 | **0,39** | 0,17 | **0,50** | 0,11 |
| GF5 | -0,23 | 0,24 | **0,01** | 0,11 | **0,60** | 0,59 |
| GF6 | -0,22 | 0,27 | **0,02** | 0,10 | **0,45** | 0,43 |
| GF8 | -0,83 | 0,21 | **-0,17** | 0,16 | **0,05** | 0,22 |
| **GF** | | | | | | |
| GF9 | -0,11 | 0,69 | **0,21** | 0,16 | **0,75** | 0,54 |
| GF10 | 0,00 | 0,77 | **0,40** | 0,14 | **0,65** | 0,25 |
| GF11 | -0,05 | 0,58 | **0,31** | 0,11 | **0,55** | 0,24 |
| GF12 | -0,22 | 0,67 | **0,26** | 0,17 | **0,50** | 0,24 |
| GF13 | -0,47 | 0,40 | **-0,02** | 0,16 | **0,60** | 0,62 |
| GF14 | -0,48 | 0,30 | **-0,09** | 0,13 | **0,45** | 0,54 |
| GF16 | -0,87 | -0,13 | **-0,33** | 0,13 | **0,00** | 0,33 |
| **P** | | | | | | |
| P1 | 0,62 | 1,48 | **1,02** | 0,20 | **1,30** | 0,28 |
| P2 | 0,59 | 1,40 | **0,94** | 0,17 | **1,20** | 0,26 |
| P3 | 0,57 | 1,26 | **0,90** | 0,17 | **1,15** | 0,25 |
| P4 | 0,54 | 1,26 | **0,86** | 0,20 | **0,90** | 0,04 |
| **W** | | | | | | |
| W1 | 0,05 | 0,22 | **0,13** | 0,05 | **0,00** | -0,13 |
| W2 | 0,13 | 0,86 | **0,45** | 0,20 | **1,00** | 0,55 |
| W3 | 0,13 | 0,84 | **0,41** | 0,19 | **0,80** | 0,39 |
| W4 | 0,05 | 0,26 | **0,14** | 0,07 | **0,15** | 0,01 |
| W5 | 0,10 | 0,72 | **0,28** | 0,14 | **0,40** | 0,12 |
| W6 | 0,07 | 0,36 | **0,19** | 0,07 | **0,10** | -0,09 |
| W7 | 0,07 | 0,64 | **0,30** | 0,15 | **0,45** | 0,15 |
| W8 | 0,07 | 0,62 | **0,34** | 0,17 | **1,00** | 0,66 |
| W9 | 0,07 | 0,53 | **0,25** | 0,12 | **0,60** | 0,35 |
| W10 | 0,03 | 0,14 | **0,07** | 0,04 | **0,10** | 0,03 |
| W11 | 0,00 | 0,08 | **0,03** | 0,02 | **0,00** | -0,03 |
| W12 | 0,04 | 0,24 | **0,13** | 0,05 | **0,10** | -0,03 |
| W13 | 0,13 | 0,93 | **0,45** | 0,21 | **0,80** | 0,35 |
| W14 | 0,09 | 0,90 | **0,45** | 0,20 | **1,00** | 0,55 |
| W15 | 0,05 | 0,15 | **0,09** | 0,02 | **0,00** | -0,09 |
| W16 | 0,06 | 0,25 | **0,13** | 0,06 | **0,15** | 0,02 |
| W17 | 0,07 | 0,81 | **0,34** | 0,17 | **0,40** | 0,06 |
| W18 | 0,08 | 0,42 | **0,22** | 0,08 | **0,20** | -0,02 |

* Differenza tra valore precalcolato della UNI EN ISO 14683 e $\psi_e$ medio calcolato secondo la UNI EN ISO 10211

Come si può notare, i valori di $\psi$ calcolati secondo la norma UNI EN ISO 10211 sono mediamente più bassi rispetto agli stessi valori standard.

I valori standard infatti sono stati ricavati per il calcolo del carico termico invernale e perciò tendono ad una sovrastima cautelativa della $\psi$.

I valori che si discostano maggiormente sono quelli relativi alle giunzioni pareti – solai contro terra: i valori standard valgono mediamente 0,39 W/(m K) in più rispetto ai valori dettagliati. Questo è dovuto al fatto che il calcolo dettagliato di $\psi$ considera tra i parametri di ingresso la dimensione caratteristica del pavimento *B*' che incide fortemente sul valore di $\psi$. Anche il nodo parete – solaio rialzato presenta valori differenti di $\psi$: i valori standard valgono mediamente 0,32 W/(m K) in più rispetto ai valori dettagliati e questo è dovuto principalmente all'introduzione del fattore $b_{tr}$ quale parametro variabile. I valori di $\psi$ che mediamente si scostano meno sono relativi alla giunzione tra due pareti esterne.

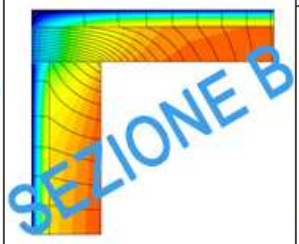
## 2.5 Creazione di un atlante di ponti termici

I ponti termici analizzati e descritti all'interno del paragrafo 2.5 sono stati raccolti e pubblicati all'interno *dell'Atlante nazionale dei ponti termici conforme alle norme UNI EN ISO 14683 e UNI EN ISO 10211*.

Scopo dell'atlante è fornire ai tecnici del settore uno strumento per la valutazione della dispersione di calore attraverso i ponti termici per un ampio novero di nodi strutturali ed al variare dei parametri di maggior interesse progettuale.

L'atlante è strutturato in "schede tipo" strutturate come in figura 2.14.

**CODICE: R1 – Giunto parete con isolamento esterno – copertura**



**Parametri di ingresso**

| | |
|---|---|
| $S_{cop}$ = 15-20-25 | cm |
| $S_{mur}$ = 20-30-40 | cm |
| $\lambda_{mur}$ = 0,25-0,50-0,90 | W/(m K) |
| $\lambda_{cls}$ = 2,0 | W/(m K) |
| $\lambda_{isol}$ = 0,04 | W/(m K) |
| $U_{cop}$ = 0,70-0,60-0,50-0,40-0,30-0,20-0,10 | W/(m²K) |
| $U_{par}$ = 0,70-0,60-0,50-0,40-0,30-0,20-0,10 | W/(m²K) |

R

SEZIONE A SEZIONE B SEZIONE C SEZIONE D

| Solaio di copertura di spessore 15 cm | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $U_m$ parete e copertura [W/(m²K)] | Muratura di spessore 20 cm | | | Muratura di spessore 30 cm | | | Muratura di spessore 40 cm | | |
| | λ muratura [W/(m K)] | | | λ muratura [W/(m K)] | | | λ muratura [W/(m K)] | | |
| | 0,25 | 0,50 | 0,90 | 0,25 | 0,50 | 0,90 | 0,25 | 0,50 | 0,90 |
| 0,70 | 0,22 | 0,21 | 0,22 | 0,12 | 0,08 | 0,09 | | -0,04 | -0,03 |
| 0,60 | 0,26 | 0,25 | 0,27 | 0,15 | 0,13 | 0,14 | | 0,02 | 0,04 |
| 0,50 | 0,29 | 0,29 | 0,30 | 0,19 | 0,18 | 0,20 | 0,10 | 0,08 | 0,10 |
| 0,40 | 0,32 | 0,32 | 0,34 | 0,22 | 0,22 | 0,24 | 0,14 | 0,13 | 0,16 |
| 0,30 | 0,34 | 0,34 | 0,36 | 0,25 | 0,26 | 0,28 | 0,18 | 0,18 | 0,21 |
| 0,20 | 0,33 | 0,34 | 0,35 | 0,27 | 0,27 | 0,29 | 0,21 | 0,22 | 0,24 |
| 0,10 | 0,27 | 0,27 | 0,28 | 0,23 | 0,23 | 0,24 | 0,20 | 0,20 | 0,22 |

| Solaio di copertura di spessore 20 cm | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $U_m$ parete e copertura [W/(m²K)] | Muratura di spessore 20 cm | | | Muratura di spessore 30 cm | | | Muratura di spessore 40 cm | | |
| | λ muratura [W/(m K)] | | | λ muratura [W/(m K)] | | | λ muratura [W/(m K)] | | |
| | 0,25 | 0,50 | 0,90 | 0,25 | 0,50 | 0,90 | 0,25 | 0,50 | 0,90 |
| 0,70 | 0,29 | 0,27 | 0,29 | [illegible] | [illegible] | [illegible] | | 0,01 | 0,02 |
| 0,60 | 0,34 | 0,32 | 0,34 | [illegible] | [illegible] | 0,20 | | 0,08 | 0,09 |
| 0,50 | 0,38 | 0,37 | 0,38 | [illegible] | [illegible] | 0,26 | 0,17 | 0,14 | 0,16 |
| 0,40 | 0,41 | 0,41 | [illegible] | [illegible] | 0,30 | 0,32 | 0,22 | 0,20 | 0,22 |
| 0,30 | 0,44 | 0,43 | 0,45 | [illegible] | 0,34 | 0,36 | 0,26 | 0,26 | 0,28 |
| 0,20 | 0,43 | [illegible] | 0,44 | [illegible] | 0,36 | 0,38 | 0,29 | 0,30 | 0,32 |
| 0,10 | 0,36 | [illegible] | 0,36 | 0,31 | 0,31 | 0,32 | 0,27 | 0,28 | 0,29 |

| Solaio di copertura di spessore 25 cm | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $U_m$ parete e copertura [W/(m²K)] | Muratura di spessore 20 cm | | | Muratura di spessore 30 cm | | | Muratura di spessore 40 cm | | |
| | λ muratura [W/(m K)] | | | λ muratura [W/(m K)] | | | λ muratura [W/(m K)] | | |
| | 0,25 | 0,50 | 0,90 | 0,25 | 0,50 | 0,90 | 0,25 | 0,50 | 0,90 |
| 0,70 | 0,35 | 0,33 | 0,34 | 0,23 | 0,18 | 0,18 | | 0,05 | 0,05 |
| 0,60 | 0,40 | 0,39 | 0,40 | 0,27 | 0,24 | 0,25 | | 0,12 | 0,13 |
| 0,50 | 0,45 | 0,44 | 0,45 | 0,33 | 0,31 | 0,32 | 0,23 | 0,19 | 0,21 |
| 0,40 | 0,49 | 0,49 | 0,50 | 0,38 | 0,37 | 0,38 | 0,28 | 0,26 | 0,28 |
| 0,30 | 0,52 | 0,52 | 0,53 | 0,42 | 0,41 | 0,43 | 0,33 | 0,32 | 0,35 |
| 0,20 | 0,52 | 0,52 | 0,53 | 0,44 | 0,44 | 0,45 | 0,37 | 0,37 | 0,39 |
| 0,10 | 0,44 | 0,43 | 0,44 | 0,39 | 0,39 | 0,40 | 0,34 | 0,34 | 0,36 |

Figura 2.14. "Scheda tipo" di un ponte termico contenuto nell'Atlante e indicazione delle parti di cui è composta

All'interno della sezione A è rappresentato il modello geometrico di ponte termico oggetto di studio con l'indicazione del sistema di dimensioni utilizzato per il calcolo della trasmittanza termica lineare (in arancione, lungo la superficie esterna del modello geometrico). I valori di trasmittanza termica lineare per ogni ponte termico sono stati calcolati considerando le dimensioni esterne secondo la definizione dettata dalla UNI EN ISO 13789.

Nella sezione B è riportata una rappresentazione modellistica del ponte termico in cui sono evidenziate le linee isoterme (a colori) e di flusso termico (linee di colore nero) attraverso cui è

possibile evincere, da un punto di vista qualitativo, le zone interessate dalla maggiore dispersione di energia termica (zone dove le linee di flusso sono caratterizzate da una densità maggiore).

La sezione C riporta l'elenco dei parametri di ingresso (fissi e variabili) con la relativa unità di misura: per ognuno dei quali è indicato il valore numerico fisso oppure l'intervallo considerato per le simulazioni effettuate. Ogni parametro progettuale variabile viene inoltre richiamato in figura (sezione A).

Infine, nella sezione D sono riportate le tabelle con i valori di trasmittanza termica lineare in funzione dei valori dei parametri di ingresso.

Ogni valore di $\psi$ compreso tra i valori riportati in tabella può essere ricavato per interpolazione lineare.

In alcuni casi le interpolazioni lineari possono essere in quantità notevole in quanto per ogni ponte termico possono essere presente più schede tecniche. È il caso dei ponti termici con diversi $b_{tr}$ o diversi *B*' come mostrano gli esempi di calcolo di seguito riportati.

Il primo esempio si riferisce ad un nodo tra parete esterna e solaio rialzato e il secondo ad un nodo parete esterna e solaio contro terra.

**Esempio di calcolo 1.** Giunto parete con isolamento esterno - solaio rialzato con isolamento all'intradosso su ambiente non riscaldato

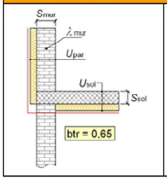
Determinazione della trasmittanza termica lineare $\psi$ relativa ad un ponte termico parete – solaio rialzato su spazio non climatizzato ($b_{tr}$ = 0,60) avente le seguenti caratteristiche: parete con muratura in laterizio forato ($\lambda_{mur}$ = 0,60 W/(m K)) da 20 cm di spessore, con isolamento a cappotto e trasmittanza termica $U_{par}$=0,28 W/(m$^2$ K); solaio con spessore 20 cm e trasmittanza termica $U_{sol}$=0,35 W/(m$^2$ K).

Riepilogo dati di ingresso:

| | |
|---|---|
| $S_{cop}$ = 20 cm | $U_{par}$ = 0,28 W/(m$^2$ K) |
| $S_{mur}$ = 20 cm | $U_{sol}$ = 0,35 W/(m$^2$ K) |
| $\lambda_{mur}$= 0,60 W/(m K) | $b_{tr}$ = 0,60 |

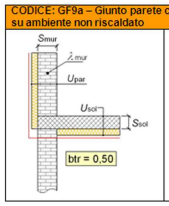
1. Si adotta la scheda GF9a - Giunto parete con isolamento esterno – solaio rialzato con isolamento all'intradosso (verso ambiente esterno e verso ambiente non climatizzato con $b_{tr}$ = 0,50-0,65).

**CODICE: GF9a – Giunto parete con isolamento esterno – solaio rialzato con isolamento all'intradosso su ambiente non riscaldato**




| Parametri di ingresso | |
|---|---|
| $S_{iso}$ = 15-20-25 | cm |
| $S_{mur}$ = 20-30-40 | cm |
| $\lambda_{mur}$ = 0,25-0,50-0,90 | W/(m K) |
| $\lambda_{cls}$ = 2,0 | W/(m K) |
| $\lambda_{iso}$ = 0,04 | W/(m K) |
| $U_{sp}$ = 0,70-0,60-0,50-0,40-0,30-0,20-0,10 | W/(m²K) |
| $U_{str}$ = 0,70-0,60-0,50-0,40-0,30-0,20-0,10 | W/(m²K) |

**CODICE: GF9a – Giunto parete con isolamento esterno - solaio rialzato con isolamento all'intradosso su ambiente non riscaldato**




| Parametri di ingresso | |
|---|---|
| $S_{iso}$ = 15-20-25 | cm |
| $S_{mur}$ = 20-30-40 | cm |
| $\lambda_{mur}$ = 0,25-0,50-0,90 | W/(m K) |
| $\lambda_{cls}$ = 2,0 | W/(m K) |
| $\lambda_{iso}$ = 0,04 | W/(m K) |
| $U_{sp}$ = 0,70-0,60-0,50-0,40-0,30-0,20-0,10 | W/(m²K) |
| $U_{str}$ = 0,70-0,60-0,50-0,40-0,30-0,20-0,10 | W/(m²K) |

**Solaio di spessore 15 cm**

| $U_m$ parete e solaio [W/(m²K)] | Muratura di spessore 20 cm λ muratura [W/(m K)] 0,25 | 0,50 | 0,90 | Muratura di spessore 30 cm λ muratura [(W/m K)] 0,25 | 0,50 | 0,90 | Muratura di spessore 40 cm λ muratura [W/(m K)] 0,25 | 0,50 | 0,90 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,70 | 0,10 | 0,16 | 0,27 | 0,10 | 0,10 | 0,23 | | 0,03 | 0,17 |
| 0,60 | 0,13 | 0,20 | 0,32 | 0,09 | 0,16 | 0,30 | | 0,09 | 0,25 |
| 0,50 | 0,16 | 0,25 | 0,37 | 0,12 | 0,21 | 0,36 | 0,08 | 0,16 | 0,33 |
| 0,40 | 0,19 | 0,29 | 0,42 | 0,16 | 0,27 | 0,42 | 0,12 | 0,23 | 0,40 |
| 0,30 | 0,23 | 0,34 | 0,47 | 0,20 | 0,32 | 0,49 | 0,16 | 0,29 | 0,48 |
| 0,20 | 0,28 | 0,40 | 0,54 | 0,25 | 0,39 | 0,56 | 0,22 | 0,37 | 0,56 |
| 0,10 | 0,33 | 0,46 | 0,61 | 0,31 | 0,46 | 0,64 | 0,28 | 0,44 | 0,64 |

**Solaio di spessore 15 cm**

| $U_m$ parete e solaio [W/(m²K)] | Muratura di spessore 20 cm λ muratura [W/(m K)] 0,25 | 0,50 | 0,90 | Muratura di spessore 30 cm λ muratura [(W/m K)] 0,25 | 0,50 | 0,90 | Muratura di spessore 40 cm λ muratura [W/(m K)] 0,25 | 0,50 | 0,90 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,70 | 0,06 | 0,11 | 0,21 | 0,06 | 0,05 | 0,16 | | -0,03 | 0,09 |
| 0,60 | 0,10 | 0,16 | 0,27 | 0,05 | 0,10 | 0,22 | | 0,04 | 0,17 |
| 0,50 | 0,13 | 0,21 | 0,32 | 0,09 | 0,16 | 0,29 | 0,05 | 0,11 | 0,25 |
| 0,40 | 0,17 | 0,26 | 0,38 | 0,13 | 0,22 | 0,37 | 0,09 | 0,18 | 0,33 |
| 0,30 | 0,21 | 0,31 | 0,44 | 0,17 | 0,28 | 0,44 | 0,13 | 0,25 | 0,42 |
| 0,20 | 0,27 | 0,38 | 0,52 | 0,23 | 0,36 | 0,53 | 0,20 | 0,34 | 0,52 |
| 0,10 | 0,32 | 0,45 | 0,60 | 0,30 | 0,44 | 0,62 | 0,27 | 0,42 | 0,62 |

**Solaio di spessore 20 cm**

| $U_m$ parete e solaio [W/(m²K)] | Muratura di spessore 20 cm λ muratura [W/(m K)] 0,25 | 0,50 | 0,90 | Muratura di spessore 30 cm λ muratura [(W/m K)] 0,25 | 0,50 | 0,90 | Muratura di spessore 40 cm λ muratura [W/(m K)] 0,25 | 0,50 | 0,90 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,70 | 0,10 | 0,14 | 0,24 | 0,14 | 0,09 | 0,20 | | 0,03 | 0,15 |
| 0,60 | 0,13 | 0,19 | 0,29 | 0,11 | 0,15 | 0,27 | | 0,10 | 0,23 |
| 0,50 | 0,16 | 0,24 | 0,35 | 0,14 | 0,21 | 0,34 | 0,12 | 0,16 | 0,31 |
| 0,40 | 0,20 | 0,28 | 0,40 | 0,17 | 0,27 | 0,41 | 0,15 | 0,23 | 0,39 |
| 0,30 | 0,23 | 0,33 | 0,48 | 0,21 | 0,32 | 0,47 | 0,18 | 0,30 | 0,47 |
| 0,20 | 0,29 | 0,40 | 0,53 | 0,27 | 0,40 | 0,55 | 0,24 | 0,38 | 0,55 |
| 0,10 | 0,34 | 0,46 | 0,61 | 0,32 | 0,47 | 0,64 | 0,30 | 0,45 | 0,65 |

5

6

**Solaio di spessore 20 cm**

| $U_m$ parete e solaio [W/(m²K)] | Muratura di spessore 20 cm λ muratura [W/(m K)] 0,25 | 0,50 | 0,90 | Muratura di spessore 30 cm λ muratura [(W/m K)] 0,25 | 0,50 | 0,90 | Muratura di spessore 40 cm λ muratura [W/(m K)] 0,25 | 0,50 | 0,90 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,70 | 0,06 | 0,09 | 0,18 | 0,09 | 0,04 | 0,13 | | -0,04 | 0,07 |
| 0,60 | 0,10 | 0,14 | 0,24 | 0,07 | 0,10 | 0,20 | | 0,04 | 0,15 |
| 0,50 | 0,13 | 0,20 | 0,30 | 0,10 | 0,16 | 0,28 | 0,08 | 0,11 | 0,24 |
| 0,40 | 0,17 | 0,25 | 0,37 | 0,14 | 0,22 | 0,35 | 0,11 | 0,18 | 0,33 |
| 0,30 | 0,21 | 0,31 | 0,43 | 0,18 | 0,29 | 0,43 | 0,15 | 0,26 | 0,41 |
| 0,20 | 0,27 | 0,38 | 0,51 | 0,25 | 0,37 | 0,53 | 0,22 | 0,35 | 0,52 |
| 0,10 | 0,33 | 0,46 | 0,60 | 0,31 | 0,45 | 0,62 | 0,29 | 0,44 | 0,63 |

3

4

**Solaio di spessore 25 cm**

| $U_m$ parete e solaio [W/(m²K)] | Muratura di spessore 20 cm λ muratura [W/(m K)] 0,25 | 0,50 | 0,90 | Muratura di spessore 30 cm λ muratura [(W/m K)] 0,25 | 0,50 | 0,90 | Muratura di spessore 40 cm λ muratura [W/(m K)] 0,25 | 0,50 | 0,90 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,70 | 0,10 | 0,12 | 0,20 | 0,17 | 0,08 | 0,17 | | 0,02 | 0,12 |
| 0,60 | 0,13 | 0,17 | 0,26 | 0,13 | 0,14 | 0,25 | | 0,09 | 0,21 |
| 0,50 | 0,16 | 0,22 | 0,32 | 0,14 | 0,20 | 0,32 | 0,14 | 0,16 | 0,30 |
| 0,40 | 0,19 | 0,27 | 0,38 | 0,18 | 0,26 | 0,39 | 0,17 | 0,24 | 0,38 |
| 0,30 | 0,23 | 0,33 | 0,44 | 0,21 | 0,32 | 0,46 | 0,19 | 0,31 | 0,47 |
| 0,20 | 0,29 | 0,39 | 0,62 | 0,27 | 0,40 | 0,55 | 0,25 | 0,39 | 0,55 |
| 0,10 | 0,34 | 0,46 | 0,60 | 0,33 | 0,47 | 0,63 | 0,31 | 0,46 | 0,65 |

**Solaio di spessore 25 cm**

| $U_m$ parete e solaio [W/(m²K)] | Muratura di spessore 20 cm λ muratura [W/(m K)] 0,25 | 0,50 | 0,90 | Muratura di spessore 30 cm λ muratura [(W/m K)] 0,25 | 0,50 | 0,90 | Muratura di spessore 40 cm λ muratura [W/(m K)] 0,25 | 0,50 | 0,90 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,70 | 0,06 | 0,07 | 0,14 | 0,12 | 0,02 | 0,10 | | -0,04 | 0,04 |
| 0,60 | 0,09 | 0,12 | 0,21 | 0,08 | 0,09 | 0,18 | | 0,03 | 0,13 |
| 0,50 | 0,12 | 0,18 | 0,28 | 0,10 | 0,15 | 0,26 | 0,10 | 0,10 | 0,23 |
| 0,40 | 0,17 | 0,24 | 0,34 | 0,15 | 0,22 | 0,34 | 0,13 | 0,18 | 0,32 |
| 0,30 | 0,21 | 0,30 | 0,41 | 0,19 | 0,29 | 0,42 | 0,16 | 0,26 | 0,41 |
| 0,20 | 0,27 | 0,38 | 0,50 | 0,25 | 0,37 | 0,52 | 0,23 | 0,36 | 0,52 |
| 0,10 | 0,33 | 0,45 | 0,59 | 0,32 | 0,46 | 0,62 | 0,30 | 0,45 | 0,63 |

2. Si calcola la trasmittanza media delle strutture di involucro opaco.

   $U_m$ = (0,28+0,35)/2 = 0,315 W/(m$^2$ K)

3. Per $b_{tr}$ = 0,50 si effettua una doppia interpolazione lineare tra i valori di $\psi$ per valori di trasmittanza termica compresi tra 0,40÷0,30 W/(m$^2$ K), rispettivamente per valori di $\lambda_{mur}$ = 0,50 W/(m K) e $\lambda_{mur}$ = 0,90 W/(m K).

   $$\psi = 0{,}31 + \frac{(0{,}25-0{,}31)}{(0{,}40-0{,}30)}(0{,}315-0{,}30) = 0{,}30 \text{ W/(m K) per valori di } \lambda_{mur} = 0{,}50 \text{ W/(m K)}$$

   $$\psi = 0{,}43 + \frac{(0{,}37-0{,}43)}{(0{,}40-0{,}30)}(0{,}315-0{,}30) = 0{,}42 \text{ W/(m K) per valori di } \lambda_{mur} = 0{,}90 \text{ W/(m K)}$$

4. Si interpolano i valori $\psi$ = 0,30 W/(m K) per $\lambda_{mur}$ = 0,50 W/(m K) e $\psi$ = 0,42 W/(m K) per $\lambda_{mur}$ = 0,90 W/(m K).

Il risultato è $\psi = 0{,}30 + \frac{(0{,}42-0{,}30)}{(0{,}9-0{,}5)}(0{,}6-0{,}5) = 0{,}33$ W/(m K)

**Esempio di calcolo 2.** Giunto parete con isolamento esterno - solaio controterra con isolamento all'intradosso

Determinazione della trasmittanza termica lineare $\psi$ relativa ad un ponte termico parete – solaio controterra, con dimensione caratteristica *B'* pari a 3 m, avente le seguenti caratteristiche: parete con muratura in laterizio forato ($\lambda_{mur}$ = 0,50 W/(m K)) da 30 cm di spessore, con isolamento a cappotto e trasmittanza termica $U_{par}$=0,30 W/(m$^2$ K); solaio con spessore 25 cm e trasmittanza termica $U_{sol}$=0,40 W/(m$^2$ K).

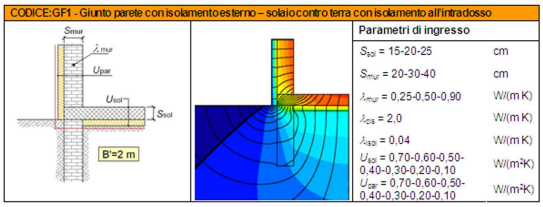
Riepilogo dati di ingresso:

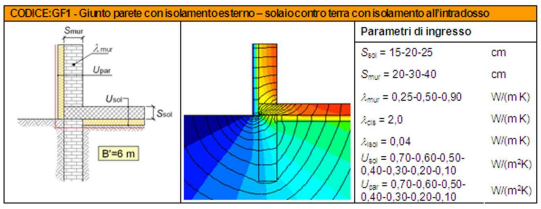
$S_{sol}$ = 25 cm $U_{par}$ = 0,30 W/(m$^2$ K)

$S_{mur}$ = 30 cm $U_{sol}$ = 0,40 W/(m$^2$ K)

$\lambda_{mur}$= 0,50 W/(m K) *B'* = 3 m

1. Si adotta la scheda GF1 - Giunto parete con isolamento esterno – solaio controterra con isolamento all'intradosso (rispettivamente con *B'* = 2-6 m).




Solaio di spessore 15 cm

| $U_m$ parete e solaio [W/(m²K)] | Muratura di spessore 20 cm λ muratura [W/(m K)] | | | Muratura di spessore 30 cm λ muratura [W/(m K)] | | | Muratura di spessore 40 cm λ muratura [W/(m K)] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,25 | 0,50 | 0,90 | 0,25 | 0,50 | 0,90 | 0,25 | 0,50 | 0,90 |
| 0,70 | 0,10 | 0,13 | 0,22 | 0,11 | 0,08 | 0,17 | | 0,02 | 0,12 |
| 0,60 | 0,12 | 0,17 | 0,26 | 0,09 | 0,12 | 0,23 | | 0,07 | 0,18 |
| 0,50 | 0,14 | 0,21 | 0,30 | 0,11 | 0,17 | 0,28 | 0,08 | 0,12 | 0,24 |
| 0,40 | 0,18 | 0,24 | 0,34 | 0,14 | 0,21 | 0,33 | 0,10 | 0,18 | 0,31 |
| 0,30 | 0,21 | 0,28 | 0,38 | 0,18 | 0,26 | 0,38 | 0,14 | 0,24 | 0,37 |
| 0,20 | 0,23 | 0,30 | 0,39 | 0,21 | 0,30 | 0,41 | 0,19 | 0,28 | 0,42 |
| 0,10 | 0,26 | 0,33 | 0,41 | 0,24 | 0,33 | 0,44 | 0,23 | 0,33 | 0,46 |

Solaio di spessore 20 cm

| $U_m$ parete e solaio [W/(m²K)] | Muratura di spessore 20 cm λ muratura [W/(m K)] | | | Muratura di spessore 30 cm λ muratura [W/(m K)] | | | Muratura di spessore 40 cm λ muratura [W/(m K)] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,25 | 0,50 | 0,90 | 0,25 | 0,50 | 0,90 | 0,25 | 0,50 | 0,90 |
| 0,70 | 0,11 | 0,13 | 0,20 | 0,16 | 0,08 | 0,16 | | 0,03 | 0,11 |
| 0,60 | 0,13 | 0,17 | 0,24 | 0,12 | 0,13 | 0,22 | | 0,08 | 0,18 |
| 0,50 | 0,15 | 0,20 | 0,29 | 0,13 | 0,17 | 0,27 | 0,12 | 0,13 | 0,24 |
| 0,40 | 0,18 | 0,24 | 0,33 | 0,16 | 0,22 | 0,32 | 0,13 | 0,19 | 0,30 |
| 0,30 | 0,21 | 0,28 | 0,37 | 0,19 | 0,27 | 0,38 | 0,16 | 0,25 | 0,37 |
| 0,20 | 0,24 | 0,30 | 0,39 | 0,22 | 0,30 | 0,41 | 0,20 | 0,29 | 0,42 |
| 0,10 | 0,26 | 0,33 | 0,41 | 0,25 | 0,34 | 0,44 | 0,24 | 0,34 | 0,46 |

Solaio di spessore 25 cm

| $U_m$ parete e solaio [W/(m²K)] | Muratura di spessore 20 cm λ muratura [W/(m K)] | | | Muratura di spessore 30 cm λ muratura [W/(m K)] | | | Muratura di spessore 40 cm λ muratura [W/(m K)] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,25 | 0,50 | 0,90 | 0,25 | 0,50 | 0,90 | 0,25 | 0,50 | 0,90 |
| 0,70 | 0,12 | 0,12 | 0,18 | 0,21 | 0,08 | 0,15 | | 0,04 | 0,10 |
| 0,60 | 0,13 | 0,16 | 0,22 | 0,14 | 0,12 | 0,20 | | 0,08 | 0,17 |
| 0,50 | 0,15 | 0,20 | 0,27 | 0,14 | 0,17 | 0,26 | 0,16 | 0,13 | 0,23 |
| 0,40 | 0,18 | 0,24 | 0,31 | 0,17 | 0,22 | 0,31 | 0,15 | 0,19 | 0,30 |
| 0,30 | 0,21 | 0,27 | 0,36 | 0,20 | 0,27 | 0,37 | 0,18 | 0,25 | 0,37 |
| 0,20 | 0,24 | 0,30 | 0,38 | 0,23 | 0,31 | 0,41 | 0,22 | 0,30 | 0,41 |
| 0,10 | 0,26 | 0,33 | 0,40 | 0,26 | 0,34 | 0,44 | 0,25 | 0,35 | 0,46 |

3

Solaio di spessore 15 cm

| $U_m$ parete e solaio [W/(m²K)] | Muratura di spessore 20 cm λ muratura [W/(m K)] | | | Muratura di spessore 30 cm λ muratura [W/(m K)] | | | Muratura di spessore 40 cm λ muratura [W/(m K)] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,25 | 0,50 | 0,90 | 0,25 | 0,50 | 0,90 | 0,25 | 0,50 | 0,90 |
| 0,70 | 0,06 | 0,11 | 0,20 | 0,08 | 0,05 | 0,15 | | 0,00 | 0,10 |
| 0,60 | 0,09 | 0,15 | 0,24 | 0,06 | 0,10 | 0,20 | | 0,05 | 0,16 |
| 0,50 | 0,12 | 0,19 | 0,28 | 0,08 | 0,14 | 0,25 | 0,06 | 0,10 | 0,22 |
| 0,40 | 0,16 | 0,23 | 0,32 | 0,12 | 0,20 | 0,31 | 0,09 | 0,16 | 0,29 |
| 0,30 | 0,19 | 0,27 | 0,36 | 0,16 | 0,25 | 0,36 | 0,13 | 0,22 | 0,35 |
| 0,20 | 0,22 | 0,29 | 0,38 | 0,20 | 0,29 | 0,40 | 0,18 | 0,27 | 0,40 |
| 0,10 | 0,25 | 0,32 | 0,40 | 0,24 | 0,32 | 0,43 | 0,22 | 0,32 | 0,45 |

Solaio di spessore 20 cm

| $U_m$ parete e solaio [W/(m²K)] | Muratura di spessore 20 cm λ muratura [W/(m K)] | | | Muratura di spessore 30 cm λ muratura [W/(m K)] | | | Muratura di spessore 40 cm λ muratura [W/(m K)] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,25 | 0,50 | 0,90 | 0,25 | 0,50 | 0,90 | 0,25 | 0,50 | 0,90 |
| 0,70 | 0,08 | 0,10 | 0,18 | 0,14 | 0,06 | 0,14 | | 0,01 | 0,10 |
| 0,60 | 0,10 | 0,14 | 0,22 | 0,09 | 0,10 | 0,20 | | 0,06 | 0,16 |
| 0,50 | 0,12 | 0,18 | 0,27 | 0,10 | 0,15 | 0,25 | 0,10 | 0,11 | 0,22 |
| 0,40 | 0,16 | 0,23 | 0,31 | 0,14 | 0,20 | 0,30 | 0,11 | 0,17 | 0,28 |
| 0,30 | 0,20 | 0,27 | 0,35 | 0,18 | 0,25 | 0,36 | 0,15 | 0,23 | 0,35 |
| 0,20 | 0,23 | 0,30 | 0,38 | 0,21 | 0,29 | 0,40 | 0,19 | 0,28 | 0,40 |
| 0,10 | 0,25 | 0,32 | 0,40 | 0,25 | 0,33 | 0,43 | 0,24 | 0,33 | 0,45 |

Solaio di spessore 25 cm

| $U_m$ parete e solaio [W/(m²K)] | Muratura di spessore 20 cm λ muratura [W/(m K)] | | | Muratura di spessore 30 cm λ muratura [W/(m K)] | | | Muratura di spessore 40 cm λ muratura [W/(m K)] | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,25 | 0,50 | 0,90 | 0,25 | 0,50 | 0,90 | 0,25 | 0,50 | 0,90 |
| 0,70 | 0,09 | 0,10 | 0,16 | 0,20 | 0,06 | 0,13 | | 0,02 | 0,09 |
| 0,60 | 0,11 | 0,14 | 0,21 | 0,12 | 0,10 | 0,18 | | 0,07 | 0,15 |
| 0,50 | 0,13 | 0,18 | 0,25 | 0,12 | 0,15 | 0,24 | 0,14 | 0,11 | 0,21 |
| 0,40 | 0,16 | 0,22 | 0,30 | 0,15 | 0,20 | 0,30 | 0,13 | 0,17 | 0,28 |
| 0,30 | 0,20 | 0,27 | 0,34 | 0,18 | 0,26 | 0,35 | 0,16 | 0,24 | 0,35 |
| 0,20 | 0,23 | 0,29 | 0,37 | 0,22 | 0,30 | 0,39 | 0,21 | 0,29 | 0,40 |
| 0,10 | 0,26 | 0,32 | 0,39 | 0,25 | 0,33 | 0,43 | 0,25 | 0,34 | 0,45 |

4

2. Si calcola la trasmittanza media delle strutture di involucro opaco.

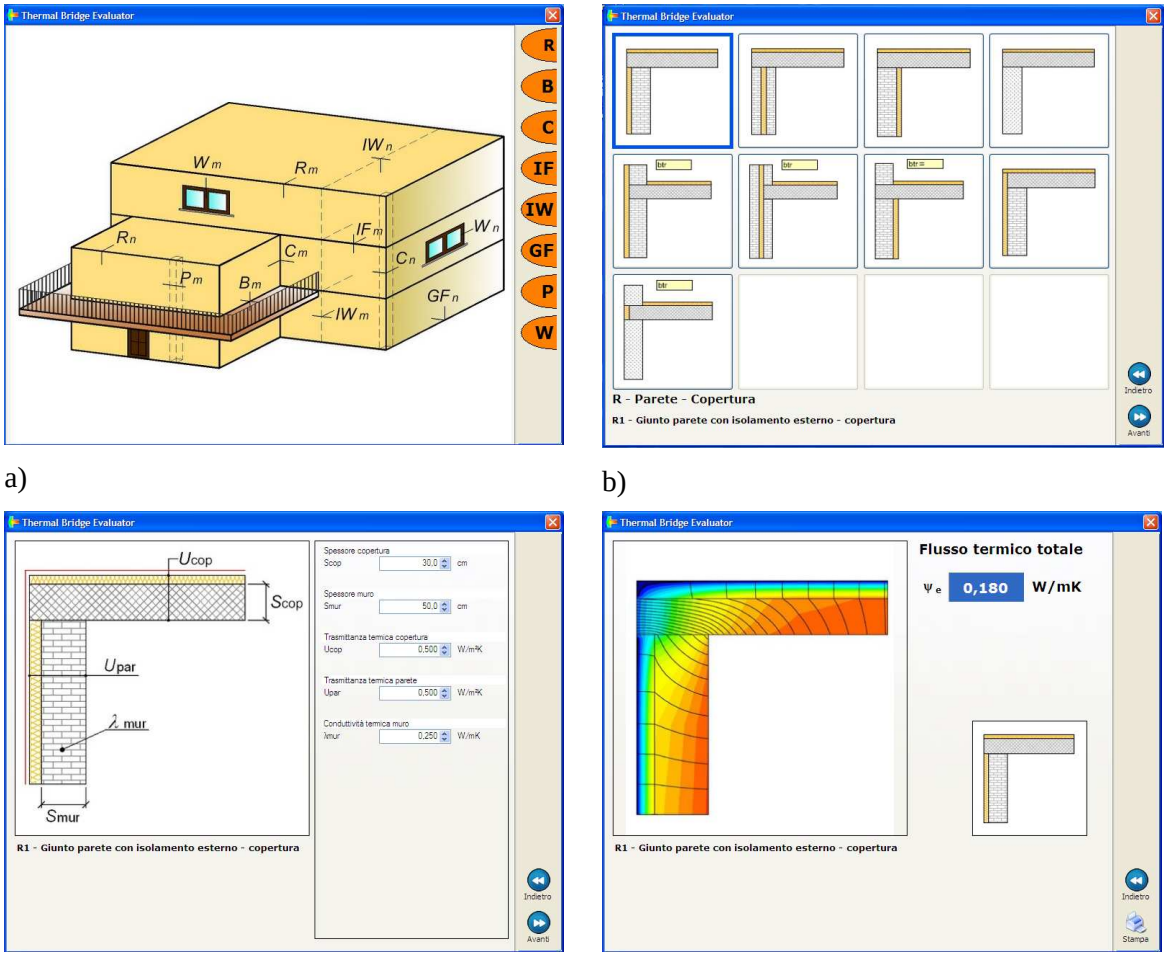
$U_m$ = (0,30+0,40)/2 = 0,35 W/(m$^2$ K)

3. Per *B'* = 2 m si interpolano i valori di $\psi$ per valori di trasmittanza termica $U_m$ compresi tra 0,40÷0,30 W/(m$^2$ K).

$$\psi = 0{,}22 + \frac{(0{,}27-0{,}22)}{(0{,}40-0{,}30)}(0{,}35-0{,}30) = 0{,}25 \text{ W/(m K)}$$

| |
|---|
| 4. Per $B'$ = 6 m si interpolano i valori di $\psi$ per valori di trasmittanza termica $U_m$ compresi tra 0,40÷0,30 W/(m$^2$ K). $$\psi = 0{,}20 + \frac{(0{,}26-0{,}20)}{(0{,}40-0{,}30)}(0{,}35-0{,}30) = 0{,}23 \text{ W/(m K)}$$ |
| 5. Si interpolano i valori $\psi$ = 0,25 W/(m K) per $B'$ = 2 m e $\psi$ = 0,23 W/(m K) per $B'$ = 6 m. |
| Il risultato è $\psi = 0{,}23 + \frac{(0{,}25-0{,}23)}{(6-2)}(3-2) = 0{,}24$ W/(m K) |

Al fine di rendere automatizzato il calcolo di interpolazione, è stato sviluppato il codice di calcolo *Thermal bridge evaluator* attraverso il quale, selezionando per ogni tipologia di ponte termico i parametri di ingresso considerati per le simulazioni, è possibile ottenere il valore di $\psi$ corrispondente ed un successivo *report* riassuntivo. Nelle immagini seguenti sono riportate le immagini relative all'interfaccia di ogni *step* di lavoro.




a) b)

c) d)

Figura 2.15. Interfacce relative al software *Thermal Bridge Evaluator*

## 2.6 Individuazione di equazioni di regressione e analisi di sensibilità

Dopo aver calcolato la trasmittanza termica lineare di ciascun ponte termico al variare delle principali variabili progettuali, si è posto l'obiettivo di valutare il peso relativo delle variabili di ingresso sulla variazione della trasmittanza termica lineare.

Per fare questo ci si è avvalsi dell'analisi di sensibilità quale strumento statistico ed in particolare della tecnica ANOVA (ANalysis Of VAriance).

Al fine di condurre un'analisi di sensibilità su ogni ponte termico in questione, è stato necessario individuare un numero rappresentativo di casi, vale a dire un numero significativo di combinazioni di parametri di ingresso e il relativo valore associato di $\psi$.

Pertanto, al fine di individuare per ogni ponte termico un numero rappresentativo di casi, sono stati sviluppati modelli di regressione sulla base dei valori di trasmittanza termica lineare ottenuti al variare dei parametri di ingresso, al fine di associare un valore di $\psi$ a qualsiasi valore di variabile di ingresso entro un *range* di valori (lo stesso *range* di valori per cui sono state condotte le simulazioni).

*Modello di regressione*

Il modello di correlazione è di tipo *gray box*, ovvero ha una forma generale non puramente statistica, ma basata su considerazioni associate al fenomeno fisico in questione.

La forma è stata individuata analizzando esempi di correlazioni lineari e non lineari presenti in letteratura all'interno degli atlanti di ponti termici di cui si è discusso al paragrafo 2.2.3 nonché nell'ambito di studi di ricerca a livello internazionale.

In particolare ci si è riferiti al lavoro di A. Ben Larbi (Ben Larbi, 2005) il quale ha individuato al pari correlazioni di tipo non lineare di forma generale secondo l'equazione seguente

$$\psi = \frac{c_1 \cdot e}{\sum_i c_2 \cdot R_{\mathrm{i}} + cd} + c_3 R_{\mathrm{adj1}} + c_4 R_{\mathrm{adj2}} + c_{\mathrm{n}} \tag{2.16}$$

dove $e$ è lo spessore del ponte termico, $R_{\mathrm{i}}$ è la resistenza termica del ponte termico fittizio $R_{\mathrm{adj}}$ è la resistenza termica dei componenti adiacenti il nodo, $c_1 \ldots c_{\mathrm{n}}$ sono i coefficienti moltiplicativi ottenuti dal modello.

Al pari del modello analizzato, la forma delle equazioni individuate prevede che il valore di trasmittanza termica lineare sia pari al rapporto tra la larghezza del ponte termico fittizio ($e$) e la relativa resistenza termica ($R_{\mathrm{i}}$) cui si somma una funzione lineare delle resistenze termiche dei componenti adiacenti ($R_{\mathrm{adj}}$) al ponte termico e le rispettive lunghezze interessate da flussi termici perturbati dal ponte termico in questione secondo l'equazione seguente:

$$\psi = \frac{c_1 \cdot e}{\sum \left(b_i \cdot R_i\right) + c_2} + f\left(R_{\mathrm{adj}}, e_{\mathrm{adj}}\right) \tag{2.17}$$

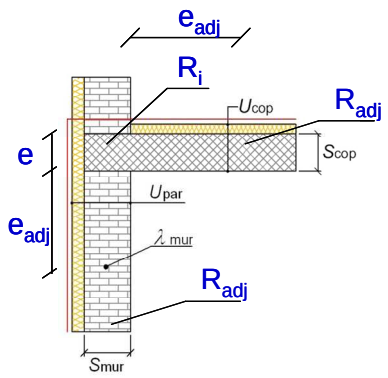
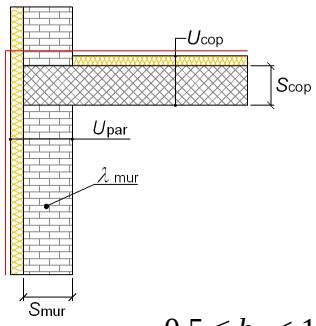



Figura 2.16. Ponte termico con variabili indipendenti per i modelli di regressione.

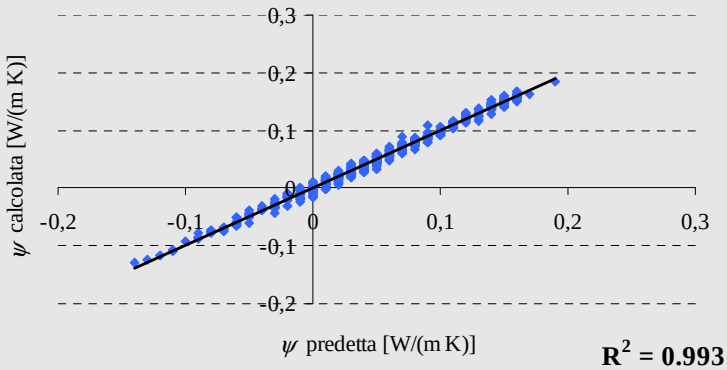
Data l'equazione generale, ogni ponte termico è caratterizzato da una propria equazione di regressione. In figura 2.17 se ne forniscono alcuni esempi relativi a diverse categorie di ponte termico.

Figura 2.17. Equazioni di correlazione per alcune tipologie di ponte termico

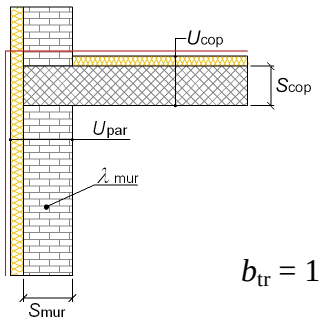
**PONTE TERMICO R5**



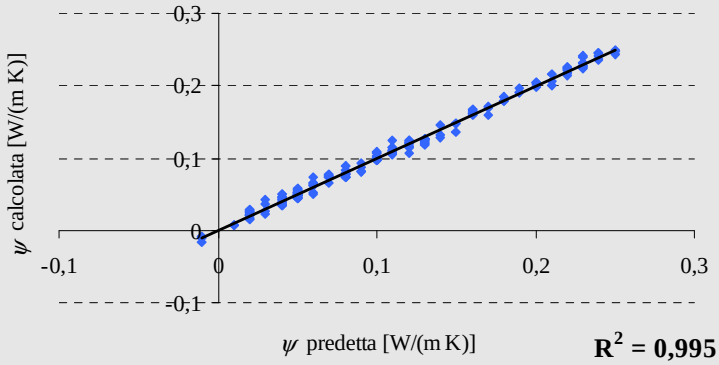

$0{,}5 \le b_{tr} < 1$




$$\psi_{R5} = \frac{S_{sol}}{\frac{S_{mur}}{\lambda_{sol}} + \frac{S_{ip}}{\lambda_{isol}} + b_{10}} + \frac{b_1 \cdot S_{mur} + b_2 \cdot S_{ip}}{\frac{S_{mur}}{\lambda_{mur}} + b_3 \cdot \frac{S_{ip}}{\lambda_{isol}} + b_4} + \frac{1}{b_{tr} + b_9} \cdot \frac{b_5 \cdot S_{mur} + b_6 \cdot S_{sol}}{b_7 \cdot \frac{S_{sol}}{\lambda_{sol}} + \frac{S_{is}}{\lambda_{isol}} + b_8} + \frac{b_{11} \cdot S_{mur} + b_{12}}{\frac{S_{sol}}{\lambda_{isol}} + \frac{S_{is}}{\lambda_{mur}} + b_{13}} + b_{14}$$

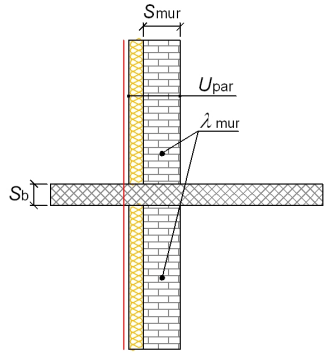


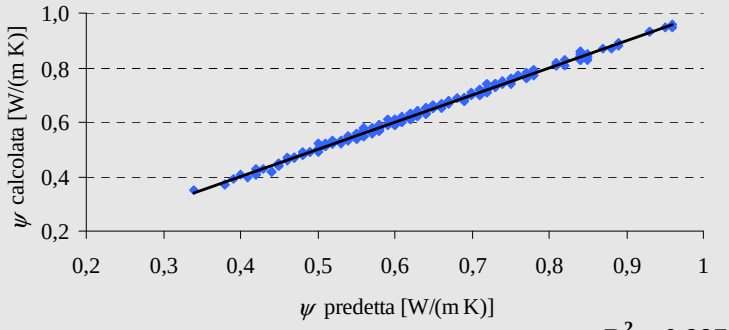

$b_{tr} = 1$




$$\psi_{R5} = \frac{S_{sol}}{\frac{S_{mur}}{\lambda_{sol}} + \frac{S_{ip}}{\lambda_{isol}} + b_6} + \frac{b_1 \cdot S_{mur} + b_2 \cdot S_{is}}{\frac{S_{mur}}{\lambda_{mur}}} + \frac{b_3 \cdot S_{mur} + b_4 \cdot S_{sol}}{\frac{S_{sol}}{\lambda_{sol}} + \frac{S_{is}}{\lambda_{isol}} + b_5} + \frac{b_7 \cdot S_{mur} + b_8}{\frac{S_{mur}}{\lambda_{mur}} + \frac{S_{is}}{\lambda_{mur}} + b_9} + b_{10}$$

**PONTE TERMICO B1**

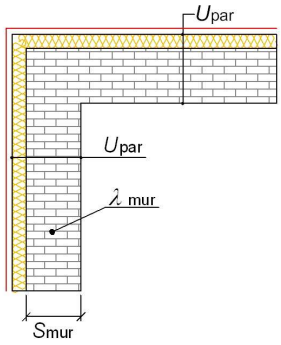


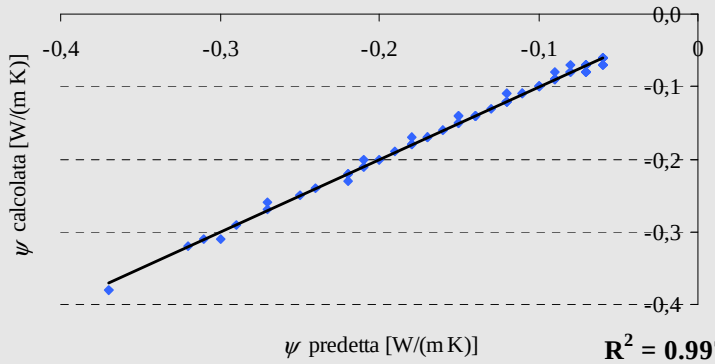




$R^2$ = **0.997**

$$\psi_{B1} = \frac{S_{sol} + b_5}{\frac{S_{mur}}{\lambda_{sol}} + \frac{S_{ip}}{\lambda_{sol}} + b_6} + \frac{b_1 \cdot S_{mur} + b_2 \cdot S_{sol}}{b_3 \cdot \frac{S_{mur}}{\lambda_{mur}} + \frac{S_{ip}}{\lambda_{isol}} + b_4} + \frac{b_7 \cdot S_{mur}}{\frac{S_{mur}}{\lambda_{mur}} + b_8 \cdot \frac{S_{ip}}{\lambda_{sol}} + b_9} + b_{10}$$

**PONTE TERMICO C1**

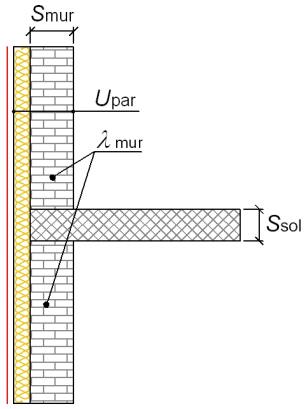


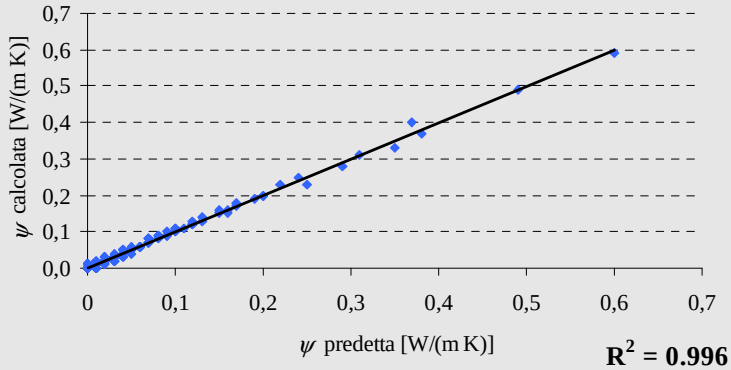




$R^2$ = **0.997**

$$\psi_{C1} = \frac{b_1 \cdot S_{mur}}{\frac{S_{mur}}{\lambda_{mur}} + \frac{S_{ip}}{\lambda_{isol}} + b_2} + \frac{b_3 \cdot S_{mur}}{\frac{S_{mur}}{\lambda_{mur}} + b_4 \cdot \frac{S_{ip}}{\lambda_{isol}} + b_5} + b_6$$

**PONTE TERMICO IF1**

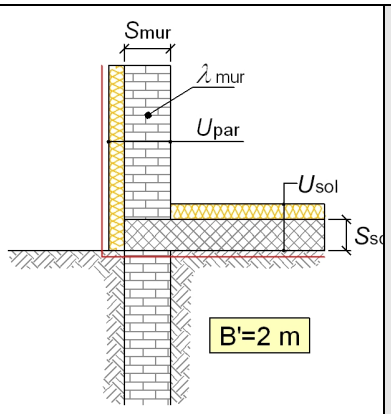


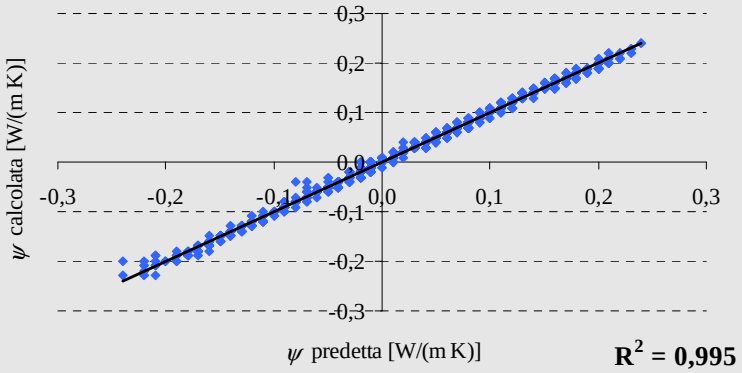




$R^2$ = **0.996**

$$\psi_{IF1} = \frac{S_{sol}}{\frac{S_{mur}}{\lambda_{sol}} + b_4 \cdot \frac{S_{ip}}{\lambda_{isol}} + b_5} + \frac{b_1 \cdot S_{sol} + b_2 \cdot S_{mur}}{\frac{S_{mur}}{\lambda_{mur}} + \frac{S_{ip}}{\lambda_{isol}} + b_3}$$

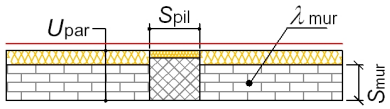
## PONTE TERMICO GF5

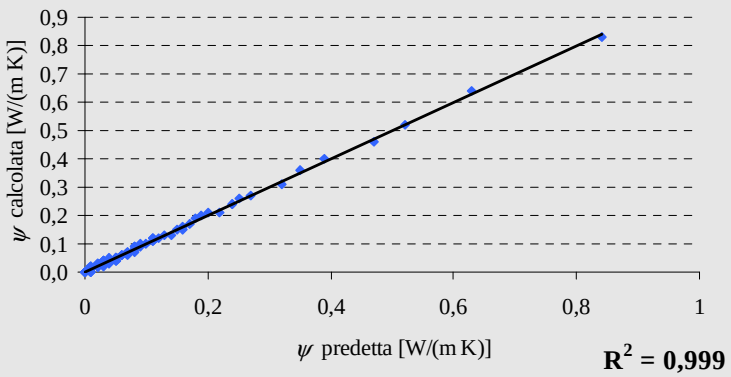



$$\psi_{GF5} = \frac{b_1 \cdot S_{mur}}{b_2 \cdot \frac{S_{is}}{\lambda_{mur}} + \frac{S_{sol}}{\lambda_{sol}} + b_3 \cdot \frac{S_{ip}}{\lambda_t} + b_4 \cdot \frac{S_{mur}}{\lambda_{mur}} + b_5} + \frac{b_6}{b_7 \cdot \frac{S_{sol}}{\lambda_{sol}} + \frac{S_{is}}{\lambda_{isol}} + b_8 \cdot B' + b_9 \cdot B'^2 + b_{10}} + \frac{b_{11} \cdot S_{sol} + b_{12} \cdot S_{mur} + b_{13}}{b_{14} \cdot \frac{S_{mur}}{\lambda_{mur}} + \frac{S_{ip}}{\lambda_{isol}} + b_{15}} + b_{16}$$

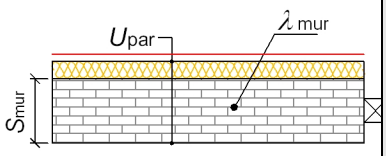
## PONTE TERMICO P5

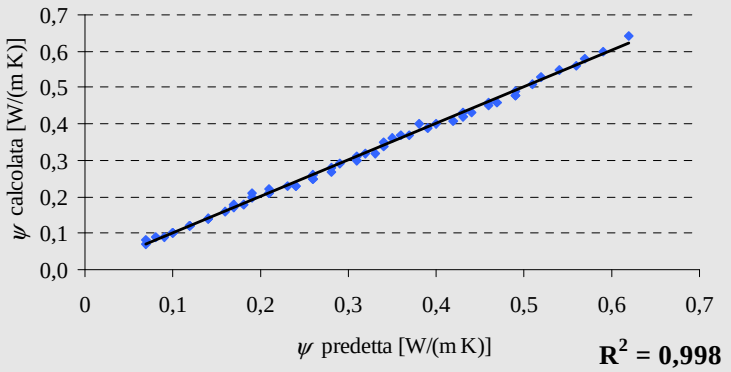



$$\psi_{P5} = \frac{S_{pil}}{\frac{S_{mur}}{\lambda_{pil}} + b_4 \cdot \frac{S_{ip}}{\lambda_{isol}} + b_5} + \frac{b_1 \cdot S_{pil}}{\frac{S_{mur}}{\lambda_{mur}} + b_2 \cdot \frac{S_{ip}}{\lambda_{isol}} + b_3}$$

## PONTE TERMICO W7

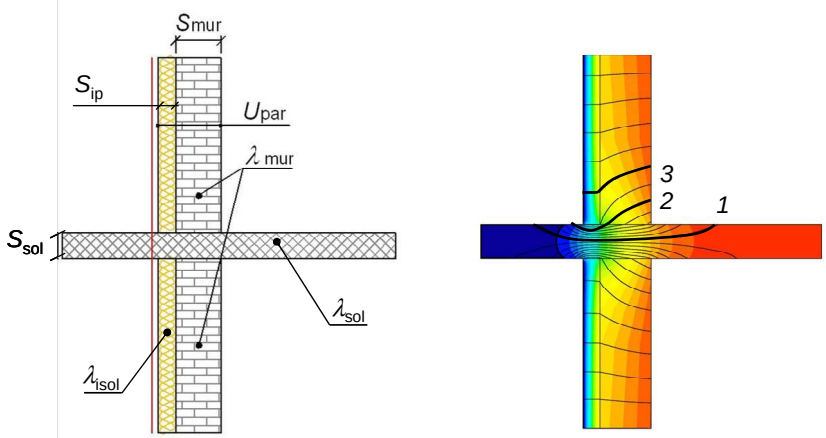



$$\psi_{W7} = \frac{S_{mur}}{\frac{S_{mur}}{\lambda_{mur}} + b_5} + \frac{b_1 \cdot S_{mur} + b_2}{b_3 \cdot \frac{S_{mur}}{\lambda_{mur}} + \frac{S_{ip}}{\lambda_{isol}} + b_4}$$

Ogni singola equazione è stata ricavata osservando il fenomeno di distorsione del campo termico relativo a ciascun nodo e le relative linee di flusso. Si prenda ad esempio il ponte termico B1 come illustrato in figura 2.18.

La prima parte dell'equazione descrive il flusso termico per unità di lunghezza e per differenza di temperatura unitaria $\psi_1$ che interessa il nodo (rappresentato in questo caso dalla soletta del balcone) ed è direttamente proporzionale allo spessore della soletta ($S_{sol}$) e inversamente proporzionale alle resistenze termiche $(S_{mur}+S_{ip})/\lambda_{sol}$ degli elementi che vengono attraversati dal flusso termico. La seconda parte dell'equazione descrive il flusso termico per unità di lunghezza e per differenza di temperatura unitaria $\psi_2$ nelle adiacenze del nodo: tale flusso è direttamente proporzionale allo spessore degli elementi che attraversa (parte della muratura di spessore $S_{mur}$ e parte del solaio di spessore $S_{sol}$) ed inversamente proporzionale alle rispettive resistenze termiche. In analogia alle prime due parti dell'equazione, la terza parte rappresenta il flusso termico bidimensionale per unità di lunghezza e per differenza di temperatura unitaria $\psi_3$ che interessa la parete.




$$\psi_{B1} = \underbrace{\frac{S_{sol}+b_5}{\frac{S_{mur}}{\lambda_{sol}}+\frac{S_{ip}}{\lambda_{sol}}+b_6}}_{\psi_1} + \underbrace{\frac{b_7\cdot S_{mur}}{\frac{S_{mur}}{\lambda_{mur}}+b_8\cdot\frac{S_{ip}}{\lambda_{sol}}}}_{\psi_2} + \underbrace{\frac{b_1\cdot S_{mur}+b_2\cdot S_{sol}}{b_3\cdot\frac{S_{mur}}{\lambda_{mur}}+\frac{S_{ip}}{\lambda_{isol}}+b_4}}_{\psi_3} + b_{10}$$

Figura 2.18. Immagine del ponte termico B1 con indicazione delle variabili in ingresso (sinistra), individuazione delle linee di flusso e delle isoterme (destra) ed equazione di regressione.

Lo stesso ragionamento è stato fatto per tutti gli altri ponti termici.

Da quanto risulta in tabella 2.8, le equazioni di regressione individuate approssimano in maniera ottimale i valori calcolati attraverso le simulazioni numeriche. Tale dato risulta evidente osservando il valore di $R^{2(4)}$.

[4] $$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i - \hat{Y}_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i - \bar{Y}\right)}$$

In tabella 2.8 sono riportati i valori di deviazione standard e media della trasmittanza termica lineare calcolata secondo la metodologia prevista dalla UNI EN ISO 10211 ($\Psi_{calc}$), della trasmittanza termica lineare prevista tramite il modello di regressione ($\Psi_{pred}$), nonché dei relativi valori dei residui.
Attraverso l'indicazione di tali indici è possibile apprezzare la correttezza dei modelli individuati per la previsione della trasmittanza termica lineare dei ponti termici oggetto di studio.

Tabella 2.8. Indici statistici relativi alla trasmittanza termica lineare calcolata e predetta per i ponti termici oggetto di studio

| **Valore medio [W/(m·K)]** | | | **Deviazione standard [W/(m·K)]** | | | **Codice** | **$R^2$** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **$\psi_{calc}$** | **$\Psi_{pred}$** | **Residui** | **$\psi_{calc}$** | **$\Psi_{pred}$** | **Residui** | | |
| 0,637 | 0,630 | 0,000 | 0,136 | 0,137 | 0,017 | B1 | **0,997** |
| -0,147 | -0,147 | 0,000 | 0,078 | 0,078 | 0,008 | **C1** | **0,997** |
| 0,040 | 0,039 | 0,000 | 0,020 | 0,021 | 0,004 | **C5** | **0,989** |
| 0,301 | 0,300 | 0,001 | 0,154 | 0,154 | 0,013 | **W7** | **0,998** |
| 0,056 | 0,056 | 0,000 | 0,087 | 0,087 | 0,006 | **IF1** | **0,996** |
| 0,063 | 0,063 | 0,000 | 0,068 | 0,067 | 0,017 | **R5** | **0,994** |
| 0,009 | 0,008 | 0,000 | 0,108 | 0,105 | 0,027 | **GF5** | **0,995** |
| -0,090 | -0,090 | 0,000 | 0,042 | 0,041 | 0,003 | **C14** | **0,995** |
| 0,067 | 0,067 | 0,000 | 0,065 | 0,065 | 0,004 | **C17** | **0,995** |
| 0,166 | 0,167 | 0,000 | 0,069 | 0,006 | 0,006 | **W12A** | **0,992** |
| 0,077 | 0,077 | 0,000 | 0,128 | 0,128 | 0,005 | **P5** | **0,998** |

*Analisi di sensibilità*

L'analisi di sensibilità è stata condotta generando un campione casuale di possibili combinazioni dei parametri fisico tecnici da cui dipende il valore di trasmittanza termica lineare per ogni ponte termico individuato nell'edifico oggetto di studio.
Sono stati generati 400 casi di combinazione dei parametri di ingresso considerando una variazione per ognuno di essi all'interno dell'intervallo specificato in tabella 2.6. Attraverso i modelli di regressione sviluppati sono stati individuati per ogni caso i valori di trasmittanza termica lineare dei ponti termici dell'edificio oggetto di studio.
La generazione del campione e l'analisi di sensitività operata con la tecnica ANOVA è stata condotta attraverso il codice SimLab 2.2. L'analisi di sensibilità è stata eseguita per ogni ponte termico secondo le seguenti fasi:

- definizione di una funzione di densità di probabilità per le variabili di ingresso: è stata scelta una funzione uniforme con un campo di variabilità per ogni parametro di ingresso compreso nell'intervallo considerato in tabella 2.6 per il quale è stata analizzata la validità di ogni modello di regressione sviluppato;
- definizione dei parametri di ingresso fissi durante le simulazioni (vedi tabelle 2.3 e 2.4);
- generazione di una matrice le cui righe *n* sono pari al numero di casi generati e il numero di colonne *k* pari alle variabili di ingresso;

---

dove $Y_i$ sono le osservazioni, $\overline{Y}$ è la loro media campionaria, $\hat{Y}_i$ sono i valori stimati. Più il valore si avvicina ad 1, più la funzione è rappresentativa.

- applicazione del modello di regressione sviluppato per la generazione di un vettore in uscita dei valori di trasmittanza termica lineare con un numero di righe pari ad *n*;
- valutazione per mezzo dell'analisi ANOVA degli indici di sensibilità del primo ordine per ogni variabile di ingresso.

La tecnica ANOVA consente di ripartire la varianza della variabile di uscita tra le diverse variabili di ingresso. La varianza è una misura della dispersione della variabile di uscita, nel nostro caso rappresentata dalla trasmittanza termica lineare di ogni ponte termico.

Attraverso tale tecnica è possibile quindi valutare il contributo di ogni variabile di ingresso alla variabilità della trasmittanza termica lineare da un punto di vista quantitativo. Inoltre attraverso il metodo ANOVA è possibile valutare l'effetto delle interazioni tra le variabili di ingresso sulla variabilità dell'output. Di conseguenza attraverso tale metodologia è stato possibile condurre l'analisi per valutare l'importanza di ogni parametro di ingresso. L'indice di sensibilità calcolato e relativo a ogni parametro di ingresso (tabelle 2.10, 2.11 e 2.12) rappresenta l'impatto della variazione di ogni variabile sulla variazione della trasmittanza termica lineare di ogni ponte termico analizzato. Alcuni degli effetti sulla variabile di uscita sono dovuti alla interazioni tra i fattori di ingresso e quindi non sono spiegati dall'indice del primo ordine. La quota assegnata alla voce *interazioni* rappresenta la quota parte della varianza della trasmittanza termica lineare che non è dovuta a effetti lineari e quindi può esser interpretata anche come una misura della non linearità del modello.

I metodi basati sull'analisi della varianza usano un rapporto tra varianze per stimare la rilevanza delle variabili di ingresso. Essi sono basati sulla scomposizione della varianza totale dell'output di un modello V(Y). La varianza di V[E(Y/Xi)] rappresenta il *main effect* di $X_i$ ed è usata per quantificare la sua rilevanza nello spiegare le variazioni nell'*output*.

Gli indici di sensibilità sono definiti attraverso il valore atteso E e la varianza V.

L'indice di sensibilità del primo ordine è definito come:

$$S_j = \frac{V\left\lfloor E\left(Y / X_j = \tilde{X}_j\right)\right\rfloor}{V(Y)} \tag{2.18}$$

Due fattori hanno interazione se il loro effetto totale sull'*output* non è uguale alla somma dei loro effetti di primo ordine. L'effetto dell'interazione di due fattori (effetto di second'ordine) è dato da:

$$S_{ij} = \frac{V\left\lfloor E(Y / X_i = \tilde{X}_i, X_j = \tilde{X}_j)\right\rfloor}{V(Y)} - \frac{V\left\lfloor E(Y / X_i = \tilde{X}_i)\right\rfloor - V\left\lfloor E(Y / X_j = \tilde{X}_j)\right\rfloor}{V(Y)} \tag{2.19}$$

Per ogni fattore di ingresso, è utile inoltre calcolare l'indice di sensibilità totale, corrispondente al suo effetto inteso come effetto del fattore $X_i$ e delle interazioni del fattore $X_i$ con tutti gli altri.

$$S_{Tj} = S_j + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{k} S_{ji} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j, m, j<m}}^{k} S_{jim} + \ldots + S_{j1\ldots k} \tag{2.20}$$

Tra gli indici di sensibilità sussiste la seguente relazione:

$$\sum_{j=1}^{n} S_j + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{k} S_{ji} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j, m, j<m}}^{k} S_{jim} + \ldots + S_{j1\ldots k} = 1 \tag{2.21}$$

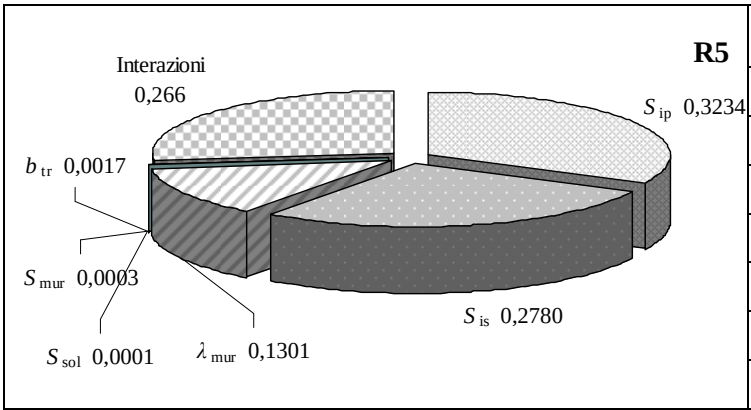
La varianza è data da :

$$V(Y) = \int_{D_1} \ldots \int_{D_k} \left[E(Y) - f(X_1, X_2, \ldots, X_k)\right]^2 . \prod_{i=1}^{i=k} P(X_i) dX_i \tag{2.22}$$

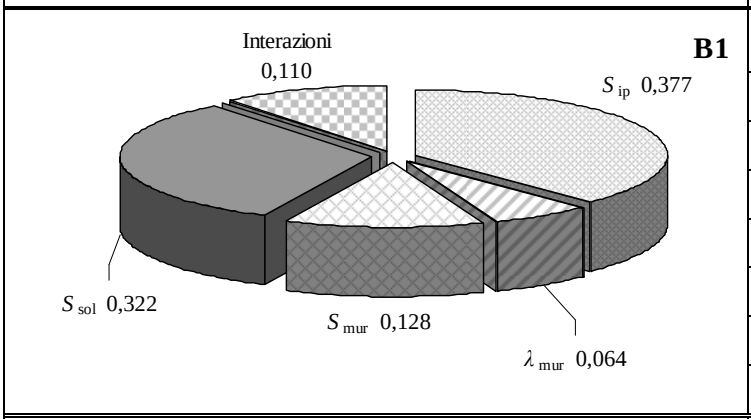
Il valore atteso è dato da:

$$E(Y) = \int_{D_1} \ldots \int_{D_k} f(X_1, X_2, \ldots, X_k) . \prod_{i=1}^{i=k} P(X_i) dX_i \tag{2.23}$$

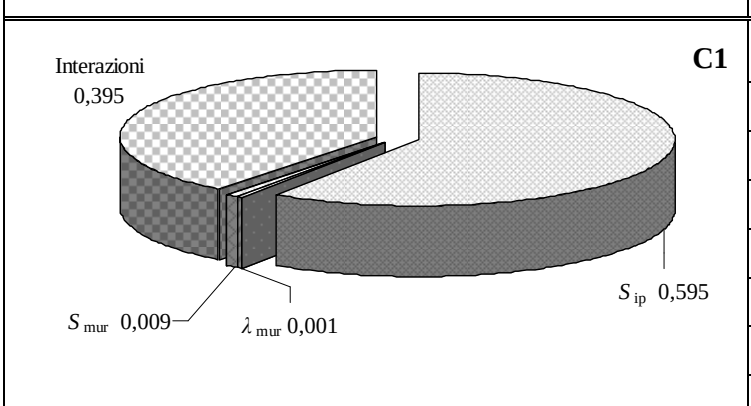
Tabella 2.9. Indici di sensibilità del primo ordine per alcuni ponti termici



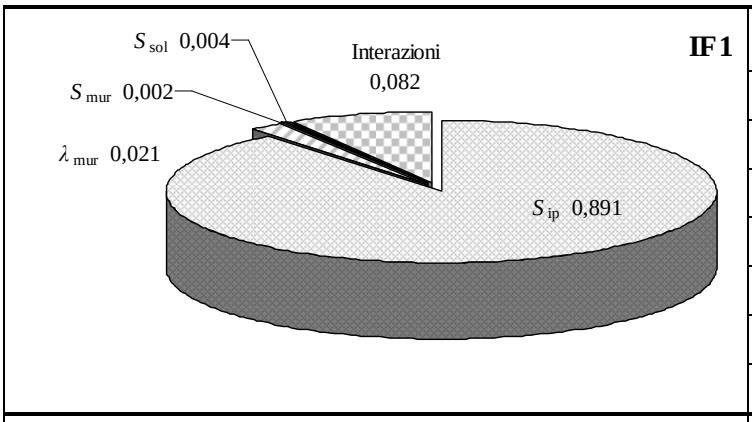

| Variabili | Indici di sensibilità del primo ordine |
|---|---|
| $S_{ip}$ | 0,323 |
| $S_{is}$ | 0,278 |
| $\lambda_{mur}$ | 0,130 |
| $S_{mur}$ | 0,000 |
| $S_{sol}$ | 0,000 |
| $b_{tr}$ | 0,002 |
| Interazioni | 0,266 |



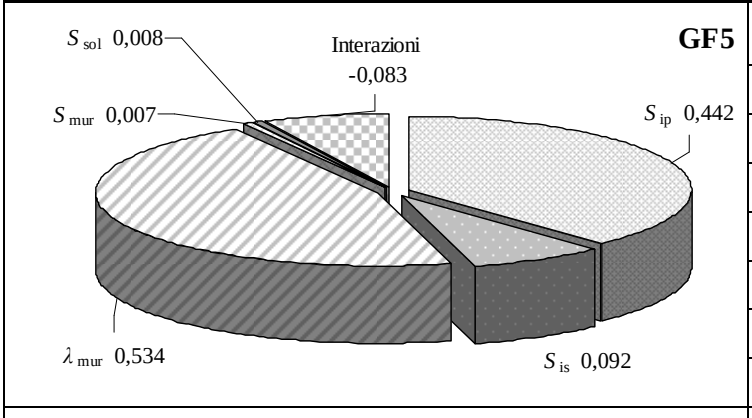

| Variabili | Indici di sensibilità del primo ordine |
|---|---|
| $S_{ip}$ | 0,377 |
| $S_{is}$ | - |
| $\lambda_{mur}$ | 0,064 |
| $S_{mur}$ | 0,128 |
| $S_{sol}$ | 0,322 |
| $b_{tr}$ | - |
| Interazioni | 0,110 |



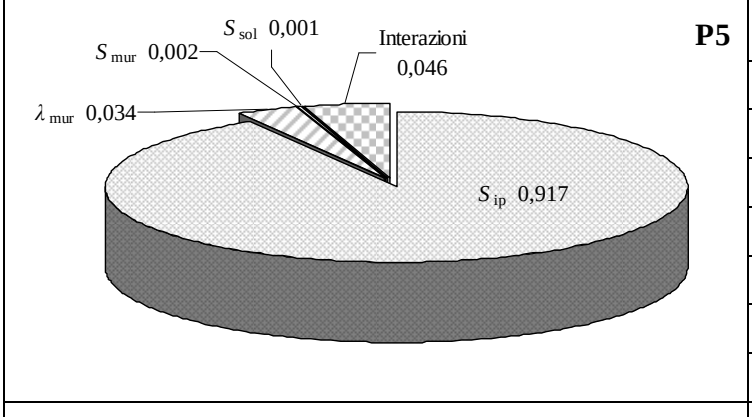

| Variabili | Indici di sensibilità del primo ordine |
|---|---|
| $S_{ip}$ | 0,595 |
| $S_{is}$ | - |
| $\lambda_{mur}$ | 0,001 |
| $S_{mur}$ | 0,009 |
| $S_{sol}$ | - |
| $b_{tr}$ | - |
| Interazioni | 0,395 |



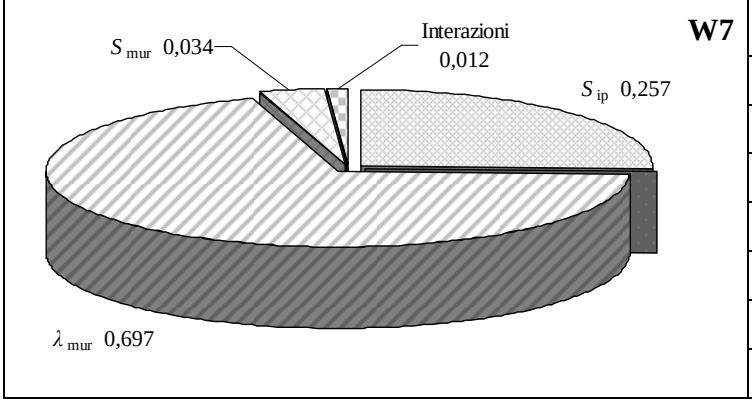

| Variabili | Indici di sensibilità del primo ordine |
|---|---|
| $S_{ip}$ | 0,891 |
| $S_{is}$ | - |
| $\lambda_{mur}$ | 0,021 |
| $S_{mur}$ | 0,002 |
| $S_{sol}$ | 0,004 |
| $b_{tr}$ | - |
| Interazioni | 0,082 |




| Variabili | Indici di sensibilità del primo ordine |
|---|---|
| $S_{ip}$ | 0,442 |
| $S_{is}$ | 0,092 |
| $\lambda_{mur}$ | 0,534 |
| $S_{mur}$ | 0,007 |
| $S_{sol}$ | 0,008 |
| $b_{tr}$ | - |
| Interazioni | -0,083 |




| Variabili | Indici di sensibilità del primo ordine |
|---|---|
| $S_{ip}$ | 0,917 |
| $S_{is}$ | - |
| $\lambda_{mur}$ | 0,034 |
| $S_{mur}$ | 0,002 |
| $S_{sol}$ | 0,001 |
| $b_{tr}$ | - |
| Interazioni | 0,046 |




| Variabili | Indici di sensibilità del primo ordine |
|---|---|
| $S_{ip}$ | 0,257 |
| $S_{is}$ | - |
| $\lambda_{mur}$ | 0,697 |
| $S_{mur}$ | 0,034 |
| $S_{sol}$ | - |
| $b_{tr}$ | - |
| Interazioni | 0,012 |

Come evidenziato in tabella 2.9, l'analisi di sensibilità ha permesso di conoscere, per ogni tipologia di ponte termico, il peso che la variazione di ogni variabile di input ha sulla variazione della variabile di output ($\psi$). Nello specifico, per gli esempi di ponte riportati, si possono trarre le seguenti considerazioni:

- per il ponte termico R5 (parete esterna - copertura) lo spessore dell'isolante del solaio e quindi la sua resistenza termica ha il maggiore effetto sulla varianza della trasmittanza termica lineare, seguito dalla spessore di isolamento della muratura;
- per il ponte termico B1 (parete esterna - balcone) le variabili che hanno maggiore peso sono lo spessore del solaio e quindi la resistenza termica della parte massiva dello stesso e lo spessore dell'isolante della parete;
- per il ponte termico C1 (angolo tra pareti) le variabili di maggiore influenza sono rappresentate dalla resistenza termica dell'isolante della parete e dalla conducibilità termica della sua parte massiva;
- per il ponte termico IF1 (parete esterna – solaio interpiano) la variabile che ha maggiore importanza è rappresentata dallo spessore di isolante della parete e in maniera molto minore la resistenza termica della muratura;
- per il ponte termico GF5 (parete esterna solaio rialzato/controterra) le variabili di maggior peso sono rappresentate dallo spessore di isolante del solaio e dalla conducibilità termica della muratura mentre la resistenza termica dello strato isolante della parete ha un effetto minore;
- per il ponte termico P5 (parete esterna - pilastro) la variabile di maggior peso è rappresentata dallo spessore di isolante della parete e in maniera minore dalla resistenza termica della muratura;
- per il ponte termico W7 (parete esterna - serramento) la conducibilità termica della muratura (secondo un fattore molto più grande del relativo spessore) influenza maggiormente la varianza della trasmittanza termica lineare seguita dalla spessore di isolante della parete.

Si riportano nella tabella seguente i risultati delle analisi di sensibilità relative a tutti ponti termici analizzati all'interno del secondo caso di studio al paragrafo 2.7 con l'evidenza in grigio due dei fattori con valori più alti dell'indice di sensibilità quando questo risulta di una certa rilevanza (≥ 0,1).

Tabella 2.10. Indici di sensibilità del primo ordine per i ponti termici con isolamento a cappotto

| **Isolamento a cappotto** | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Codici** | $S_{ip}$ | $S_{is}$ | $\lambda_{mur}$ | $S_{mur}$ | $S_{M1}$ | $S_{M2}$ | $S_{sol}$ | $S_{pil}$ | $b_{tr}$ | **Interazioni** |
| **R5** | 0,3234 | 0,2780 | 0,1301 | 0,0003 | | | 0,0001 | | 0,0017 | 0,266 |
| **B1** | 0,377 | | 0,064 | 0,128 | | | 0,322 | | | 0,110 |
| **C1** | 0,595 | | 0,001 | 0,009 | | | | | | 0,395 |
| **C5** | 0,527 | | 0,002 | 0,005 | | | | | | 0,467 |
| **C14** | 0,550 | | 0,040 | 0,005 | | | | | | 0,405 |
| **C17** | 0,741 | | 0,005 | 0,013 | | | | | | 0,241 |
| **P5** | 0,917 | | 0,034 | 0,002 | | | | 0,001 | | 0,046 |
| **IF1** | 0,891 | | 0,021 | 0,002 | | | 0,004 | | | 0,082 |
| **GF5** | 0,442 | 0,092 | 0,534 | 0,007 | | | 0,008 | | | 0,083 |
| **W12A** | 0,415 | | 0,562 | 0,012 | | | | | | 0,011 |
| **W7** | 0,257 | | 0,697 | 0,034 | | | | | | 0,012 |

Tabella 2.11. Indici di sensibilità del primo ordine per i ponti termici con isolamento ad intercapedine

| Isolamento ad intercapedine | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Codici** | $S_{ip}$ | $S_{is}$ | $\lambda_{mur}$ | $S_{mur}$ | $S_{M1}$ | $S_{M2}$ | $S_{sol}$ | $S_{pil}$ | $b_{tr}$ | **Interazioni** |
| **R6** | 0,391 | 0,619 | 0,058 | | 0,002 | 0,013 | 0,001 | | 0,008 | -0,084 |
| **B2** | 0,221 | | 0,088 | | 0,242 | 0,108 | 0,309 | | | 0,033 |
| **C10** | 0,673 | | 0,131 | | 0,038 | 0,019 | | | | 0,139 |
| **C11** | 0,800 | | 0,099 | | 0,002 | 0,010 | | | | 0,089 |
| **C18** | 0,079 | | 0,684 | | 0,128 | 0,032 | | | | 0,078 |
| **C19** | 0,270 | | 0,647 | | 0,048 | 0,006 | | | | 0,029 |
| **P2** | 0,191 | | 0,124 | | 0,084 | 0,083 | | 0,400 | | 0,118 |
| **P7** | 0,202 | | 0,545 | | 0,035 | 0,006 | | 0,073 | | 0,139 |
| **P9** | 0,603 | | 0,002 | | 0,004 | 0,170 | | 0,096 | | 0,126 |
| **IF2** | 0,465 | | 0,000 | | 0,246 | 0,173 | 0,064 | | | 0,053 |
| **IF5** | 0,299 | | 0,318 | | 0,041 | 0,002 | 0,129 | | | 0,211 |
| **GF6** | 0,707 | 0,013 | 0,152 | | 0,014 | 0,005 | 0,032 | | | 0,078 |
| **W8** | 0,118 | | 0,858 | | 0,010 | 0,005 | | | | 0,009 |
| **W11** | 0,607 | | 0,001 | | 0,011 | 0,009 | | | | 0,372 |

Tabella 2.12. Indici di sensibilità del primo ordine per i ponti termici con isolamento interno

| Isolamento interno | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Codici** | $S_{ip}$ | $S_{is}$ | $\lambda_{mur}$ | $S_{mur}$ | $S_{M1}$ | $S_{M2}$ | $S_{sol}$ | $S_{pil}$ | $b_{tr}$ | **Interazioni** |
| **R7** | 0,187 | 0,345 | 0,010 | 0,107 | | | 0,249 | | 0,003 | 0,100 |
| **B3** | 0,370 | | 0,050 | 0,149 | | | 0,339 | | | 0,092 |
| **C3** | 0,750 | | 0,027 | 0,030 | | | | | | 0,193 |
| **C7** | 0,716 | | 0,088 | 0,029 | | | | | | 0,168 |
| **C9** | 0,731 | | 0,038 | 0,031 | | | | | | 0,200 |
| **C22** | 0,844 | | 0,004 | 0,035 | | | | | | 0,117 |
| **P6** | 0,918 | | 0,020 | 0,003 | | | | 0,004 | | 0,055 |
| **IF3** | 0,327 | | 0,032 | 0,158 | | | 0,347 | | | 0,137 |
| **GF7** | 0,077 | 0,871 | 0,001 | 0,025 | | | 0,007 | | | 0,020 |
| **W9** | 0,247 | | 0,666 | 0,066 | | | | | | 0,021 |
| **W12** | 0,496 | | 0,432 | 0,054 | | | | | | 0,018 |
| | | | | | | | | | | |

## 2.7 Analisi dell'incidenza dei ponti termici sul fabbisogno energetico dell'edificio

Al fine di valutare l'incidenza dei ponti termici sul coefficiente di scambio termico globale nonché sul fabbisogno di energia termica degli edifici, si sono analizzati alcuni casi di studio.

Per uno stesso caso di studio sono state quindi condotte analisi parametriche per valutare la variazione del fabbisogno di energia termica al variare di alcuni dati di ingresso e quindi al variare della $\psi$ dei ponti termici individuati.

Lo scambio termico attraverso i ponti termici è stato considerato sia con metodo semplificato, attraverso i valori standard di $\psi$ della norma UNI EN ISO 14683, sia attraverso i valori di $\psi$ calcolati secondo la norma UNI EN ISO 10211.

Il calcolo del fabbisogno di energia termica è stato condotto secondo una valutazione standard attraverso la metodologia di calcolo della specifica tecnica UNI/TS 11300-1 come riportato all'interno del capitolo 1, sottoparagrafo 1.2.1

Il calcolo è stato condotto in periodo invernale. Si sono considerate la temperatura dell'ambiente climatizzato pari a 20 °C e la temperatura esterna media mensile secondo la norma UNI 10349.

Il tasso di ventilazione considerato è di 0,3 $h^{-1}$ per gli ambienti climatizzati. Gli apporti interni sono stati calcolati secondo quanto indicato dalla UNI/TS 11300-1 per gli edifici residenziali secondo le equazioni 1.54 e 1.55.

Edificio residenziale

Il primo caso di studio (figura 2.19) considerato consiste in un edificio residenziale monofamiliare a due piani fuori terra climatizzati di superficie pari 115 $m^2$ e un piano interrato non climatizzato.

Il solaio del primo piano fuori terra è in parte a contatto con il terreno e in parte a contatto con l'interrato non climatizzato, che risulta costituito da tre pareti perimetrali a contatto con il terreno e da una parete a contatto con l'esterno.

Al fine di confrontare l'incidenza dei ponti termici per due diverse tecnologie costruttive, lo stesso caso di studio è stato valutato rispettivamente per:

- pareti esterne con isolamento a cappotto
- pareti esterne con isolamento nell'intercapedine.

Al fine di confrontare l'incidenza dei ponti termici sul fabbisogno termico dell'edificio, per ciascuna tipologia costruttiva sono stati inoltre considerati tre diversi livelli di resistenza termica dello strato di isolante termico per l'intero involucro opaco disperdente rispettivamente:

- trasmittanza termica conforme al limite legislativi nazionali secondo il D.Lgs. 311/2006 pari a U=0,30 [W/($m^2$K)] per la zona climatica E
- trasmittanza termica pari a U=0,25 [W/($m^2$K)] (edificio ben isolato)
- trasmittanza termica pari a U=0,15 [W/($m^2$K)] (edificio molto ben isolato)

L'involucro trasparente è costituito da infissi con doppi vetri basso emissivi caratterizzati da una trasmittanza del solo vetro pari a $U_g$=1,3 [W/($m^2$K)] e telaio in legno con trasmittanza $U_f$=1,7 [W/($m^2$K)].

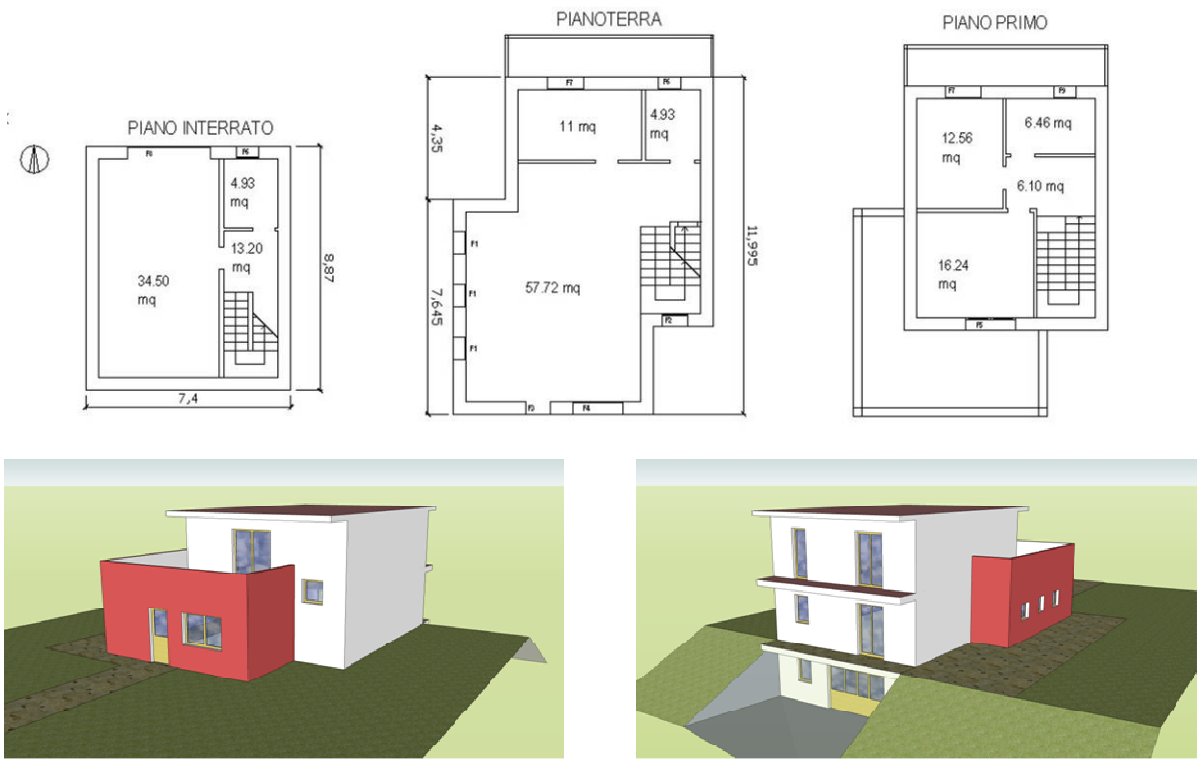



Figura 2.19. Piante e modelli tridimensionali del caso di studio

L'edificio in esame presenta diverse tipologie di ponte termico: in corrispondenza della giunzione tra parete esterna e solaio interpiano, della giunzione tra la parete esterna e la copertura, dell'angolo tra due pareti esterne, della parete esterna con i balconi e della parete esterna con il telaio.

Complessivamente sono state considerate 15 diverse configurazioni di ponte termico per pareti con isolamento a cappotto, 14 configurazioni per pareti con isolamento in intercapedine per un totale di 198 m di lunghezza di ponte termico tra ambiente climatizzato ed esterno, 16 m tra ambiente climatizzato e ambiente non climatizzato e 40 m da ambiente non climatizzato ad ambiente esterno.

Per i ponti termici analizzati, corrispondenti a situazioni non ottimali dal punto di vista della continuità dell'isolamento termico, si è proceduto all'individuazione di alcune soluzioni tecnologiche di correzione (figura 2.20 e 2.21).

Per quanto riguarda l'isolamento a cappotto, la correzione ha interessato principalmente gli aggetti in corrispondenza della copertura e dei solai, i nodi in prossimità delle pareti contro terra e le giunzioni parete-infissi.

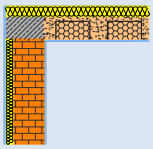
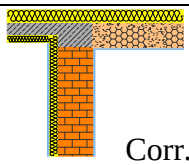
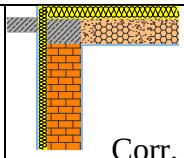
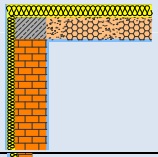
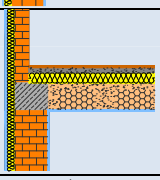
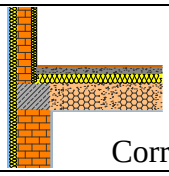
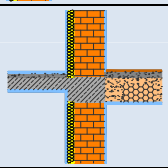
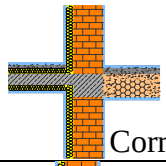
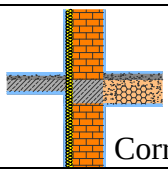
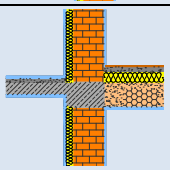
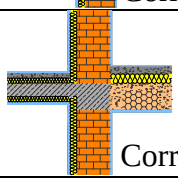
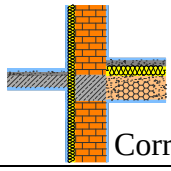
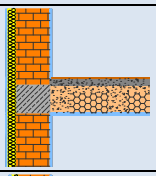
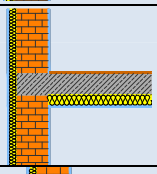
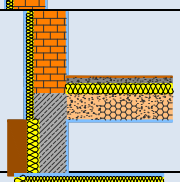
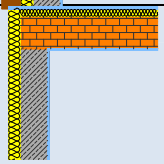
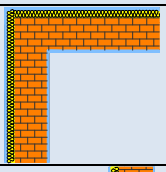
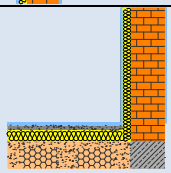
In particolare per le coperture, nonché in corrispondenza dei solai interpiano in aggetto (pt01, pt04, pt05) si sono ipotizzate due soluzioni alternative: incapsulamento dell'aggetto con rispettivamente 5, 8 e 10 cm di isolante (corr. 1) e continuità dell'isolamento con ancoraggio dell'aggetto (corr. 2).

In prossimità del parapetto del balcone (pt03) è stata considerata una sola correzione corrispondente al risvolto dell'isolante di copertura di 5, 8 e 10 cm di isolante termico.

Nel caso di giunzione tra parete esterna e solaio contro terra (pt13, pt14) si sono confrontate tre alternative progettuali: l'inserimento dell'isolante termico in corrispondenza della parete di fondazione (corr. 1), il risvolto dell'isolante a solaio di spessore 2 cm per un'altezza di 6 cm dalla pavimentazione (corr. 2) e l'inserimento di una lastra di 6 cm di vetro cellulare in prossimità della muratura in laterizio (corr. 4).

Per quanto riguarda l'isolamento nell'intercapedine tutte le configurazioni di ponte termico, eccettuati gli angoli, presentavano discontinuità. In tutti i casi di aggetto esterno (pt01, pt04, pt05) sono state confrontate la soluzione di incapsulamento dell'aggetto con 5, 8 e 10 cm (corr. 1), valutando anche l'efficacia dell'isolamento della testa dell'aggetto (corr. 2), e di continuità dell'isolante verticale mediante sistema di disgiunzione dell'aggetto e ancoraggio dello stesso alla trave portante. In corrispondenza dell'attacco della copertura alle pareti est e ovest (pt02) e dell'attacco della parete a sud con la terrazza sud (pt03) è stata mantenuta la continuità dell'isolante termico verticale che risvolta sul solaio orizzontale. Anche l'attacco tra solaio intermedio e muratura è stato corretto ipotizzando l'arretramento della trave del solaio che poggia sulla muratura e viene isolata dall'isolante verticale (pt06, pt07, pt08). In corrispondenza del terrazzo a sud-est (pt11) l'isolante di parete si raccorda all'isolante del solaio: il raccordo prevede che sia posto un corso di vetro cellulare sotto ai forati di rivestimento esterni. Infine sono state considerate quattro soluzioni di correzione degli attacchi del solaio a terra alla muratura (pt13, pt14): isolamento della testa del solaio (corr. 1), isolamento della testa del solaio e risvolto dell'isolante del solaio lungo il perimetro interno con uno spessore 2 cm per un'altezza di 6 cm dalla pavimentazione (corr. 2), risvolto dell'isolante verticale sul marciapiede esterno (corr. 3) e inserimento di una lastra di 12 cm di vetro cellulare in prossimità della muratura in laterizio (corr. 4). Per i serramenti è stata previsto l'isolamento del foro della finestra (spallette, soglia e architrave) con 5 cm di isolante termico con conduttività analoga a quella dell'isolante a parete.

I calcoli di trasmittanza termica lineare sono stati effettuati unicamente per il caso di studio corrispondente ad un valore di trasmittanza termica dell'involucro pari a U=0,25 W/($m^2$K), risultando analoghe le correzioni attuabili nei restanti casi.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 01 |  |  Corr.1 | |  Corr. 3 |
| 02 |  | | | |
| 03 |  |  Corr.1 | | |
| 04 |  |  Corr.1 | |  Corr. 3 |
| 05 |  |  Corr.1 | |  Corr. 3 |
| 06 |  | | | |
| 07 |  | | | |
| 08 |  | | | |
| 09 |  | | | |
| 10 |  | | | |
| 11 |  | | | |

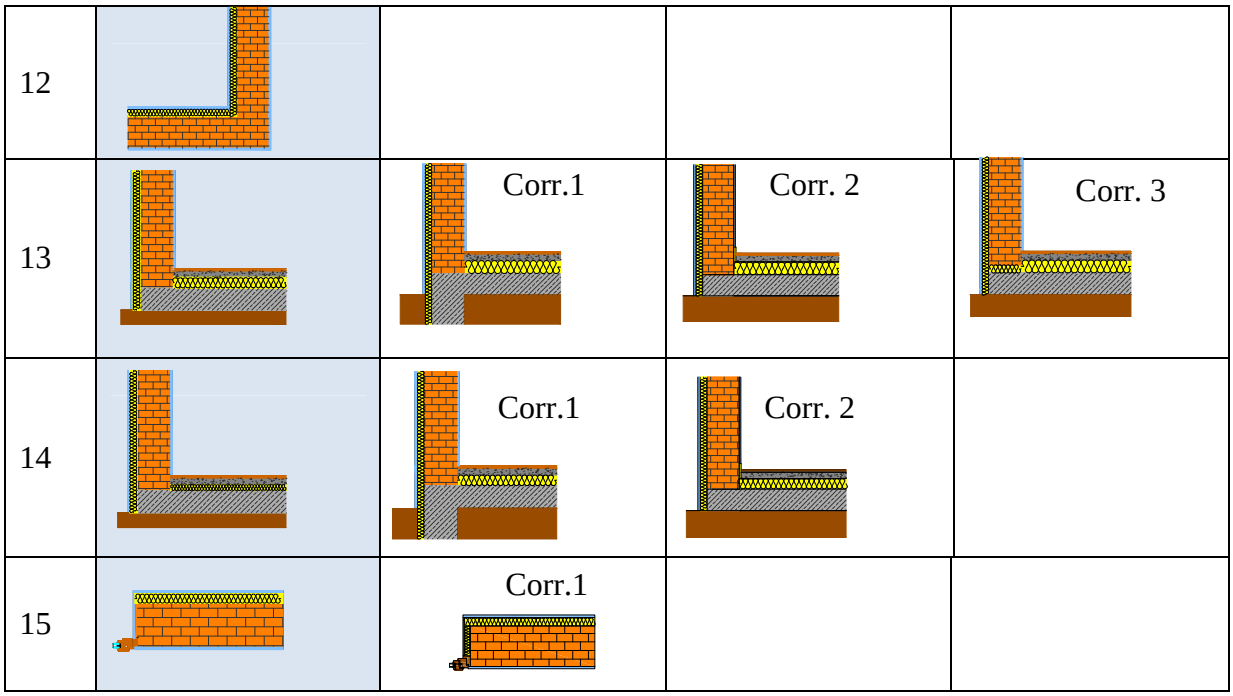
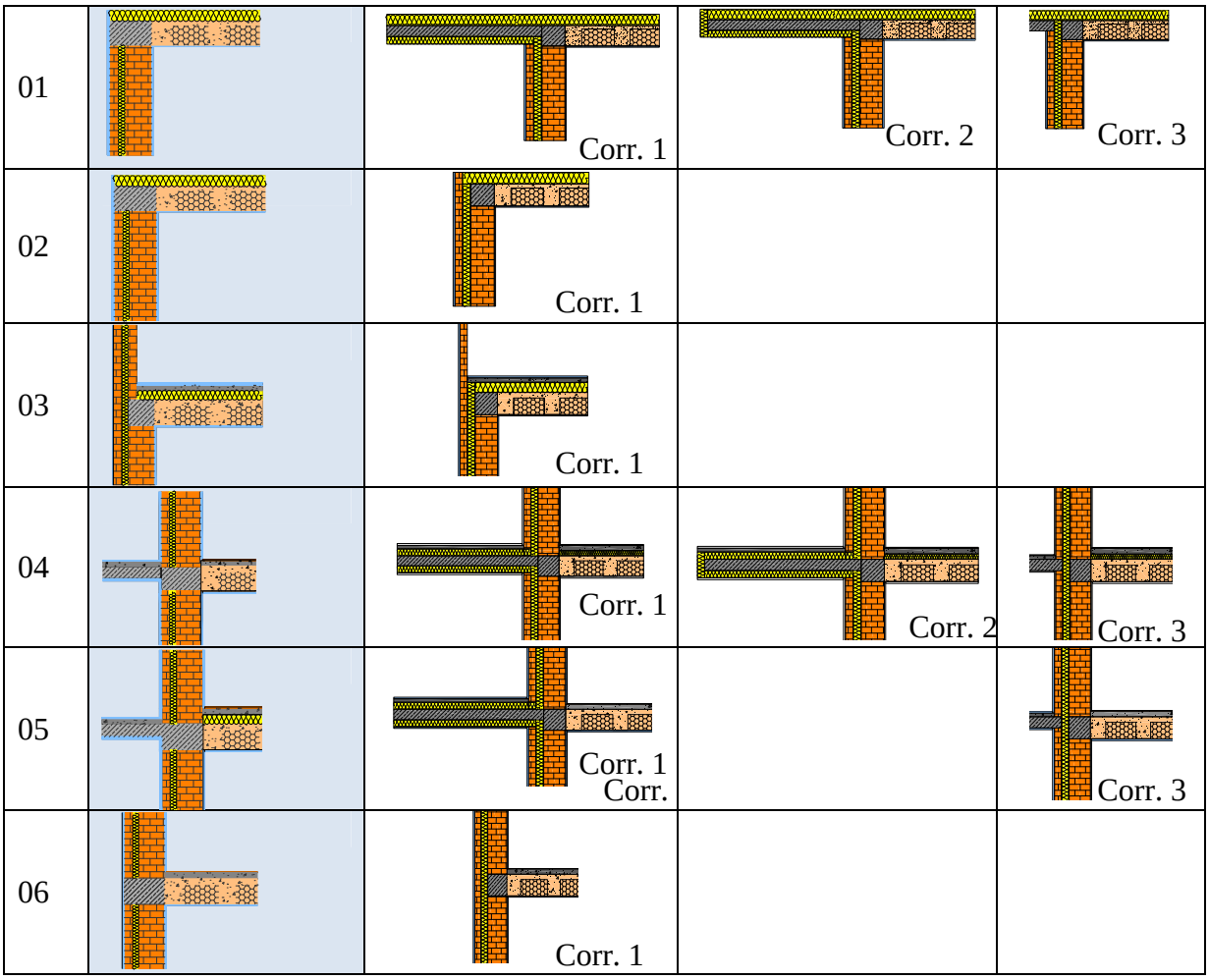



Figura 2.20. Ponti termici e relative correzioni per isolamento termico a cappotto



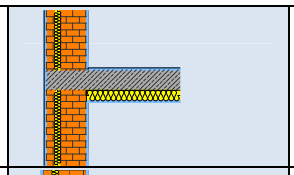
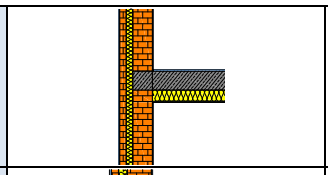
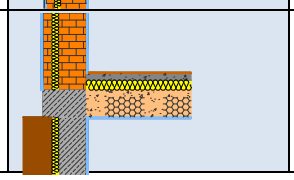
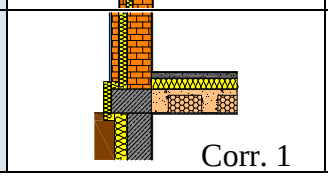
| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 07 |  |  | | |
| 08 |  |  Corr. 1 | | |

Figura 2.21. Ponti termici e relative correzioni per isolamento termico ad intercapedine

In tabella 2.13 e 2.14 sono riportati i valori di $\psi_i$ calcolati per i casi di ponte termico non corretto e per le relative correzioni rispettivamente per struttura a cappotto e per struttura con isolante intermedio. I coefficienti calcolati sono stati confrontati con i corrispondenti valori tabulati secondo le configurazioni analoghe riportate in UNI EN ISO 14683 i cui valori sono riportati in tabella.

Confrontando i coefficienti dei ponti non corretti si osserva che nel caso della configurazione con isolamento a cappotto, i valori più alti dei coefficienti lineari si riscontrano per l'attacco della copertura, per gli angoli e per l'inserimento dei serramenti. Nel caso di isolamento in intercapedine, invece, i coefficienti lineari maggiori si riscontrano nei casi dell'attacco dei solai interpiano, nei balconi e nel caso di solaio a terra (pt13). Confrontando i valori ottenuti per valori diversi della trasmittanza termica della struttura, in generale si vede come vi sia un leggero calo dei coefficienti al diminuire della trasmittanza termica. Tutti i valori calcolati sono largamente inferiori ai corrispondenti valori riportati dalla UNI EN ISO 14683, ad eccezione delle configurazioni di angolo e dell'attacco del solaio interpiano nel caso di cappotto esterno (pt06). In questi casi i risultati sono del tutto in accordo con la normativa considerando che essa arrotonda i coefficienti al multiplo di 0,05 W/(m K) più vicino.

Dall'analisi delle soluzioni corrette i valori dei coefficienti per le due tipologie costruttive risultano più simili e in quasi tutti i casi molto vicini alle corrispondenti soluzioni della normativa. Le eccezioni sono date dai ponti termici a terreno, per i quali la normativa non riporta delle soluzioni correttive coerenti con le soluzioni individuate per il caso in esame e dai ponti termici in corrispondenza del nodo telaio-muratura per il quale i valori calcolati risultano la metà dei coefficienti tabellati.

In generale l'incapsulamento della soletta non è una correzione equivalente all'isolamento continuo della testa del solaio, in termini di dispersione: infatti il coefficiente lineare della prima soluzione è circa doppio rispetto alla seconda.

Inoltre facendo variare lo spessore di isolante nel caso di incapsulamento della soletta a sbalzo della copertura con 5 cm, 8 cm e 10 cm di isolante si nota che da 5 a 8 cm, così come da 8 a 10 cm si ottiene un abbassamento minimo del coefficiente lineare (dal 6% al 12%).

Interessante risulta la valutazione delle correzioni dell'attacco a terra: in questo caso il prolungamento del cappotto per 1,5 m sotto il terreno (cappotto pt13 corr. 1) o il risvolto dell'isolante

dell'intercapedine sul marciapiede (intercapedine pt13 corr. 3) sono soluzioni analoghe per le due tipologie costruttive considerate che portano ad un coefficiente lineare che è pari (approssimando al multiplo di 0,05 W/(m K) più vicino) nel caso considerato a 0,10 W/(m K). Quest'ultimo valore è inoltre identico se si corregge il ponte termico prevedendo di costruire il primo corso della muratura in vetro cellulare di altezza tale dal raccordarsi con l'isolante termico posto sul pavimento (pt13 corr. 4): in questo caso la configurazione è analoga ad un angolo ed il coefficiente lineare corrisponde ad un ponte di tipo C1 secondo la classificazione riportata in.

Nel caso del pt14 il coefficiente lineare è stato calcolato a partire dalla conduttanza termica bidimensionale fornita dal modello di calcolo e andando a scomputare le dispersioni attraverso il solaio considerandone la trasmittanza effettiva caratteristica dell'intero interrato, come da UNI EN ISO 13370.

Tabella 2.13. Valori di $\psi$ per pareti con isolamento a cappotto

| | | **Coefficienti per ponti termici parzialmente corretti $\psi_i$ [W/m K]** | | | | | **Coefficienti per ponti termici corretti $\psi_i$ [W/m K]** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | **$U_w$=0,25** | | | | | | | |
| | | | | | | | **Corr. 1** | | | | | | | |
| Codice | | **$U_w$=0,30** | **$U_w$=0,25** | **$U_w$=0,15** | **UNI EN ISO 14683** | | **5 cm** | **8 cm** | **10 cm** | **Corr. 2** | **Corr. 3** | **Corr. 4** | **UNI EN ISO 14683** | |
| 01 | | 0,49 | 0,49 | 0,47 | 0,75 | R1 | 0,27 | 0,26 | 0,25 | **0,15** | - | - | C1 | 0,15 |
| 02 | | 0,17 | 0,15 | 0,10 | 0,15 | C1 | - | - | - | - | - | - | | |
| 03 | | 0,34 | 0,26 | 0,14 | 0,80 | R5 | 0,18 | **0,18** | 0,18 | - | - | - | C1 | 0,15 |
| 04 | | 0,58 | 0,59 | 0,56 | 0,95 | B1 | 0,35 | 0,29 | 0,26 | **0,13** | - | - | IF1 | 0,10 |
| 05 | $\Psi_{iu}$ | 0,01 | 0,07 | 0,07 | 0,95 | B1 | 0,11 | 0,11 | 0,12 | **0,14** | - | - | IF1 | 0,10 |
| | $\Psi_{ie}$ | 0,17 | 0,12 | 0,09 | | | 0,05 | 0,04 | 0,03 | **0,01** | - | - | | |
| | $\Psi_{ue}$ | 0,71 | 0,61 | 0,55 | | | 0,33 | 0,30 | 0,28 | **0,17** | - | - | | |
| 06 | | 0,16 | 0,12 | 0,07 | 0,10 | IF1 | | | | | | | | |
| 07 | $\Psi_{iu}$ | 0,14 | 0,15 | 0,13 | 0,10 | IF1 | | | | | | | | |
| | $\Psi_{ie}$ | 0,13 | 0,11 | 0,07 | | | | | | | | | | |
| | $\Psi_{ue}$ | 0,03 | 0,02 | 0,02 | | | | | | | | | | |
| 08 | $\Psi_{iu}$ | 0,15 | 0,14 | 0,11 | 0,10 | IF1 | | | | | | | | |
| | $\Psi_{ie}$ | 0,03 | 0,03 | 0,03 | | | | | | | | | | |
| | $\Psi_{ue}$ | 0,53 | 0,52 | 0,44 | | | | | | | | | | |
| 09 | | 0,13 | 0,11 | 0,08 | 0,15 | C1 | | | | | | | | |
| 10 | | 0,10 | 0,09 | 0,07 | 0,15 | C1 | | | | | | | | |
| 11 | | -0,18 | -0,16 | -0,12 | -0,15 | C5 | | | | | | | | |
| 12 | | -0,19 | -0,17 | -0,13 | -0,15 | C5 | | | | | | | | |
| 13 | | 0,15 | 0,14 | 0,13 | 0,75 | GF5 | | **0,10** | | 0,11 | - | 0,10 | GF5 | 0,75 |
| 14 | | 0,40 | 0,43 | 0,46 | 0,75 | GF5 | | **0,30** | | 0,40 | - | 0,37 | GF5 | 0,75 |
| 15 | | 0,19 | 0,21 | 0,24 | 0,80 | W13 | | **0,09** | | - | - | - | W18 | 0,2 |

Tabella 2.14. Valori di $\psi$ per pareti con isolamento in intercapedine

| | | **Coefficienti per ponti termici parzialmente corretti $\psi_i$ [W/m K]** | | | | | **Coefficienti per ponti termici corretti $\psi_i$ [W/m K]** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | **$U_w$=0,25** | | | | | | | |
| | | | | | | | **Corr. 1** | | | | | | | |
| Codice | | **$U_w$=0,30** | **$U_w$=0,25** | **$U_w$=0,15** | **UNI EN ISO 14683** | | **5 cm** | **8 cm** | **10 cm** | **Corr. 2** | **Corr. 3** | **Corr. 4** | **UNI EN ISO 14683** | |
| 01 | | 0,36 | 0,36 | 0,33 | 0,75 | R2 | 0,27 | 0,25 | 0,25 | | **0,13** | | R9 | 0,15 |
| 02 | | 0,36 | 0,36 | 0,33 | 0,75 | R2 | | **0,13** | | | | | R9 | 0,15 |
| 03 | | 0,20 | 0,18 | 0,13 | 0,70 | R6 | | **0,13** | | | | | C2 | 0,10 |
| 04 | | 0,65 | 0,64 | 0,58 | 1,05 | B2 | 0,33 | 0,29 | 0,27 | | **0,12** | | IF1 | 0,10 |

| | | **Coefficienti per ponti termici parzialmente corretti $\psi_i$ [W/m K]** | | | | | **Coefficienti per ponti termici corretti $\psi_i$ [W/m K]** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Codice | | **$U_w$=0,30** | **$U_w$=0,25** | **$U_w$=0,15** | **UNI EN ISO 14683** | | **$U_w$=0,25** | | | | | | **UNI EN ISO 14683** | |
| | | | | | | | **Corr. 1** | | | **Corr. 2** | **Corr. 3** | **Corr. 4** | | |
| | | | | | | | **5 cm** | **8 cm** | **10 cm** | | | | | |
| 05 | $\Psi_{iu}$ | 0,02 | 0,04 | 0,05 | 1,05 | B2 | 0,08 | 0,08 | 0,09 | | **0,11** | | IF1 | 0,10 |
| | $\Psi_{ie}$ | 0,13 | 0,12 | 0,09 | | | 0,06 | 0,06 | 0,05 | | **0,03** | | | |
| | $\Psi_{ue}$ | 0,46 | 0,46 | 0,44 | | | 0,26 | 0,22 | 0,22 | | **0,10** | | | |
| 06 | | 0,66 | 0,64 | 0,60 | 1,05 | IF2 | | **0,11** | | | | | IF1 | 0,10 |
| 07 | $\Psi_{iu}$ | 0,04 | 0,05 | 0,05 | 1,05 | IF2 | | **0,11** | | | | | IF1 | 0,10 |
| | $\Psi_{ie}$ | 0,45 | 0,45 | 0,42 | | | | **0,10** | | | | | | |
| | $\Psi_{ue}$ | 0,10 | 0,09 | 0,07 | | | | **0,01** | | | | | | |
| 08 | $\Psi_{iu}$ | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 1,05 | IF2 | | **0,16** | | | | | IF1 | 0,10 |
| | $\Psi_{ie}$ | 0,12 | 0,11 | 0,08 | | | | **0,03** | | | | | | |
| | $\Psi_{ue}$ | 0,99 | 0,97 | 0,92 | | | | **0,46** | | | | | | |
| 09 | | 0,11 | 0,11 | 0,08 | 0,10 | C2 | | | | | | | | |
| 10 | | 0,09 | 0,08 | 0,07 | 0,10 | C2 | | | | | | | | |
| 11 | | -0,12 | -0,10 | -0,07 | -0,10 | C6 | | **-0,13** | | | | | C6 | -0,10 |
| 12 | | -0,18 | -0,16 | -0,12 | -0,10 | C6 | | | | | | | | |
| 13 | | 0,19 | 0,16 | 0,14 | 0,60 | GF6 | | 0,14 | | 0,11 | 0,11 | **0,09** | GF5 | 0,75 |
| 14 | | 0,27 | 0,28 | 0,21 | 0,60 | GF6 | | 0,32 | | 0,29 | **0,16** | 0,32 | GF5 | 0,75 |
| 15 | | 0,16 | 0,19 | 0,22 | 0,40 | W17 | | **0,09** | | | | | W18 | 0,20 |

Al fine di valutare il peso delle dispersioni termiche attraverso i ponti termici e l'efficacia delle correzioni adottate sul consumo energetico totale, nonché confrontare metodo semplificato e metodo dettagliato, è stato calcolato il fabbisogno termico utile dell'edificio nelle condizioni climatiche di Milano e di Roma.

La tabella 2.15 mostra le diverse voci del bilancio termico e il peso percentuale delle perdite attraverso i ponti termici sul totale delle dispersioni nel caso in cui i coefficienti adottati siano quelli da UNI EN ISO 14683 e nel caso di coefficienti calcolati. Nel primo caso le dispersioni attraverso i ponti termici sono di circa 100 W/K per isolamento a cappotto e 97 W/K per isolamento in intercapedine. Il peso percentuale dei ponti termici sulle dispersioni è molto alto, circa il 38-39% per strutture con trasmittanza termica di 0,30 W/(m$^2$ K) fino al 46-47% per strutture da 0,15 W/(m$^2$ K). Adottando le opportune correzioni è possibile arrivare a circa 37 W/K e 35 W/K, quindi percentualmente in caso di ponti termici corretti si arriva ad ottenere un peso percentuale di questa voce del 20% sulle dispersioni totali, dimezzandone così l'incidenza.

Anche se i coefficienti calcolati risultano in genere più bassi, tuttavia il peso percentuale dei ponti termici non corretti sul totale delle dispersioni risulta comunque importante rimanendo sopra il 20% in tutti i casi di resistenza termica delle strutture. Inoltre, all'aumentare della resistenza termica delle strutture edilizie la voce relativa alle dispersioni per ponti termici assume una incidenza analoga o addirittura superiore a quella delle dispersioni per trasmissione monodimensionale attraverso l'involucro opaco (si confronti a proposito il caso di trasmittanza 0,15 W/(m$^2$ K) in tabella 2.15).

Andando a correggere tutti i ponti termici si può arrivare ad una incidenza del 12% nel caso di isolamento a cappotto e del 10% nel caso di isolamento in intercapedine. Il peso percentuale, anche

in questo caso, è circa dimezzato. Si noti che con le correzioni la tipologia costruttiva con isolante in intercapedine garantisce minori dispersioni rispetto a quella a cappotto.

Tabella 2.15. Suddivisione delle dispersioni termiche nelle singole voci del bilancio termico e incidenza dei ponti termici: confronto tra l'applicazione della UNI EN ISO 14683 e della UNI EN ISO 10211

| | Parete con cappotto esterno | | | | | | | | Parete con isolamento in intercapedine | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **EN ISO 14683** | $U_w$ = 0,30 | | $U_w$ = 0,25 | | $U_w$ = 0,25 Corretto | | $U_w$ = 0,15 | | $U_w$ = 0,30 | | $U_w$ = 0,25 | | $U_w$ = 0,25 Corretto | | $U_w$ = 0,15 | |
| **Dispersioni term.** | W/K | % | W/K | % | W/K | % | W/K | % | W/K | % | W/K | % | W/K | % | W/K | % |
| Involucro opaco | 69.5 | *27* | 58.7 | *24* | 58.7 | *33* | 35.8 | *17* | 70.2 | *28* | 57.9 | *24* | *57.9* | *33* | 36.0 | *17* |
| Finestre | 33.9 | *13* | 33.9 | *14* | 33.9 | *19* | 33.9 | *16* | 33.9 | *13* | 33.9 | *14* | *33.9* | *19* | 33.9 | *16* |
| **Ponti termici** | **99.7** | ***39*** | **99.7** | ***41*** | **36.6** | ***21*** | **99.7** | ***47*** | **96.7** | ***38*** | **96.7** | ***41*** | ***35.0*** | ***20*** | **96.7** | ***46*** |
| Terreno | 6.1 | *2* | 5.3 | *2* | 5.3 | *3* | 3.4 | *2* | 6.1 | *2* | 5.1 | *2* | *5.1* | *3* | 3.5 | *2* |
| Zone non riscaldate | 15.0 | *6* | 13.0 | *5* | 12.7 | *7* | 8.2 | *4* | 14.9 | *6* | 12.9 | *5* | *12.8* | *7* | 8.2 | *4* |
| Ventilazione | 31.1 | *12* | 31.1 | *13* | 31.1 | *17* | 31.1 | *15* | 31.1 | *12* | 31.1 | *13* | *31.1* | *18* | 31.1 | *15* |
| ***Dispersioni totali*** | ***255.2*** | | ***241.6*** | | ***178.3*** | | ***212.1*** | | ***252.9*** | | ***237.6*** | | ***175.8*** | | ***209.4*** | |
| **EN ISO 10211** | $U_w$ = 0,30 | | $U_w$ = 0,25 | | $U_w$ = 0,25 Corretto | | $U_w$ = 0,15 | | $U_w$ = 0,30 | | $U_w$ = 0,25 | | $U_w$ = 0,25 Corretto | | $U_w$ = 0,15 | |
| **Dispersioni term.** | W/K | % | W/K | % | W/K | % | W/K | % | W/K | % | W/K | % | W/K | % | W/K | % |
| Involucro opaco | 69.5 | *35* | 58.7 | *32* | 58.7 | *36* | 35.8 | *24* | 70.2 | *35* | 57.9 | *31* | *57.9* | *37* | 36.0 | *23* |
| Finestre | 33.9 | *17* | 33.9 | *18* | 33.9 | *21* | 33.9 | *23* | 33.9 | *17* | 33.9 | *18* | *33.9* | *21* | 33.9 | *22* |
| **Ponti termici** | **41.4** | ***21*** | **40.8** | ***22*** | **18.7** | ***12*** | **33.3** | ***23*** | **42.0** | ***21*** | **42.6** | ***23*** | ***16.1*** | ***10*** | **41.3** | ***27*** |
| Terreno | 6.1 | *3* | 5.3 | *3* | 5.3 | *3* | 3.4 | *2* | 6.1 | *3* | 5.1 | *3* | *5.1* | *3* | 3.5 | *2* |
| Zone non | 14.9 | *8* | 14.1 | *8* | 14.2 | *9* | 9.5 | *6* | 15.3 | *8* | 13.4 | *7* | *14.1* | *9* | 8.9 | *6* |
| Ventilazione | 31.1 | *16* | 31.1 | *17* | 31.1 | *19* | 31.1 | *21* | 31.1 | *16* | 31.1 | *17* | *31.1* | *20* | 31.1 | *20* |
| ***Dispersioni totali*** | ***196.9*** | | ***183.9*** | | ***161.9*** | | ***146.9*** | | ***198.6*** | | ***183.9*** | | ***158.1*** | | ***154.6*** | |

In figura 2.22 è visibile il peso dei ponti termici sul fabbisogno termico invernale dell'edificio: considerando i coefficienti come da UNI EN ISO 14683 le perdite attraverso i ponti termici costituiscono più della metà del fabbisogno termico, variando tra 50%, 54%, 65% a Milano e fra 62%, 68% e 85% a Roma a seguito della variazione di trasmittanza termica della struttura. Le percentuali rilevate sono simili per le due tipologie costruttive. Nel caso di ponti termici corretti per la struttura con trasmittanza termica pari a 0,25 W/($m^2$ K), l'incidenza dei ponti termici sul fabbisogno si riduce e diventa del 30% a Milano e del 43% a Roma.

Considerando i coefficienti lineari calcolati, le dispersioni per ponti termici non corretti variano tra il 28% e 38% a Milano e tra il 38% e il 60% a Roma nel caso di strutture isolate con cappotto esterno, mentre sono un po' più rilevanti nel caso di struttura con isolamento in intercapedine: tra il 30 e il 43% a Milano e tra il 41% e il 67% a Roma. Nel caso di ponti termici corretti le percentuali sono un po' più elevate per la struttura a cappotto: 17% a Milano e 27% a Roma contro 16% e 25% della struttura con isolante in intercapedine.

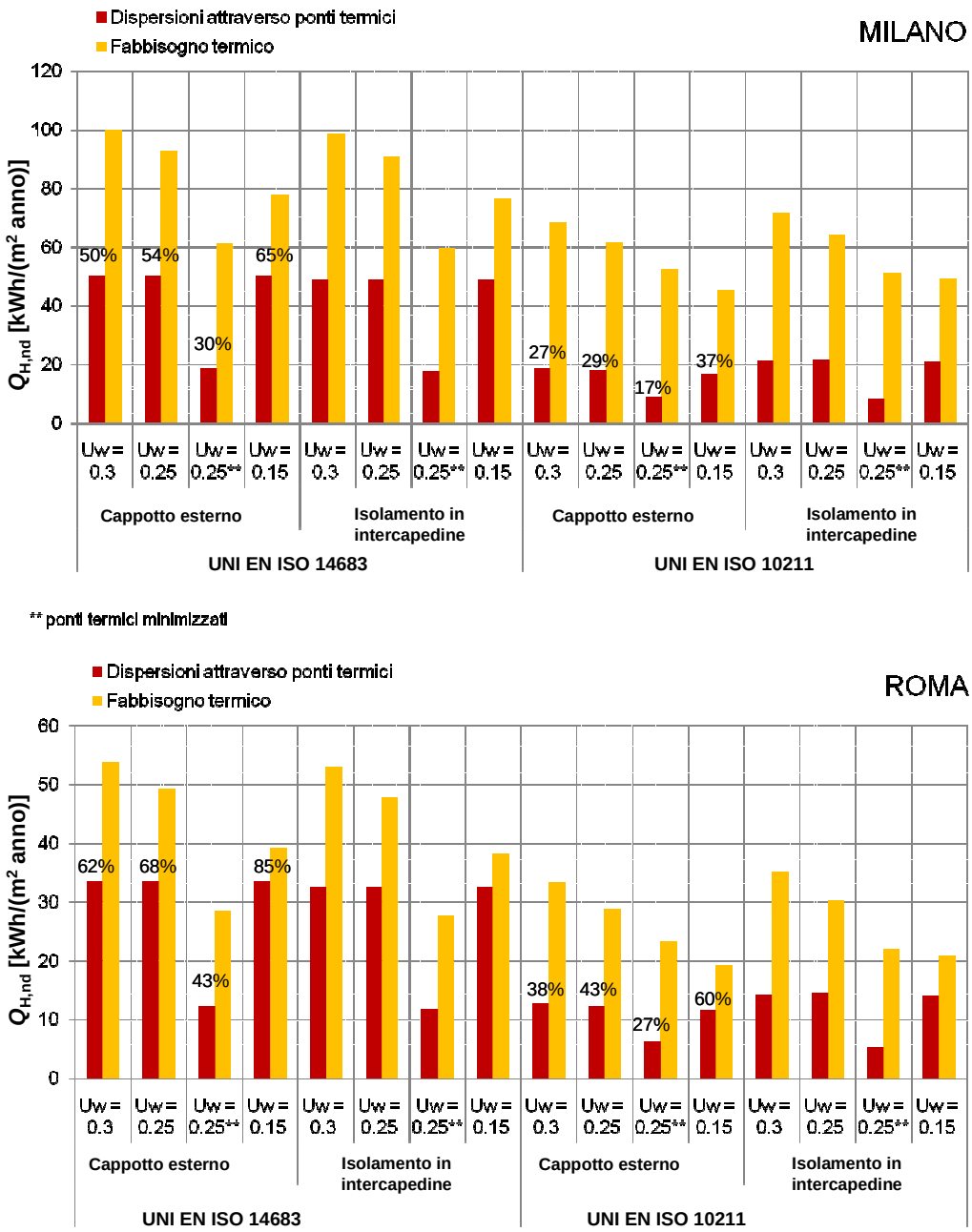



Figura 2.22. Incidenza delle dispersioni di calore attraverso i ponti termici sul fabbisogno di energia termica per la località di Milano e di Roma.

<u>Palazzina residenziale</u>

Il secondo caso di studio analizzato consiste in una palazzina residenziale (figura 2.23) caratterizzata da tre piani fuori terra climatizzati e vani scala e sottotetto non climatizzati.

Ogni piano comprende sei unità residenziali con superficie utile pari a 70,35 $m^2$ ciascuna, per un totale di 1266 $m^2$. L'edificio presenta una superficie disperdente di circa 2450 $m^2$ e un rapporto di forma pari a circa 0,17 $m^{-1}$.

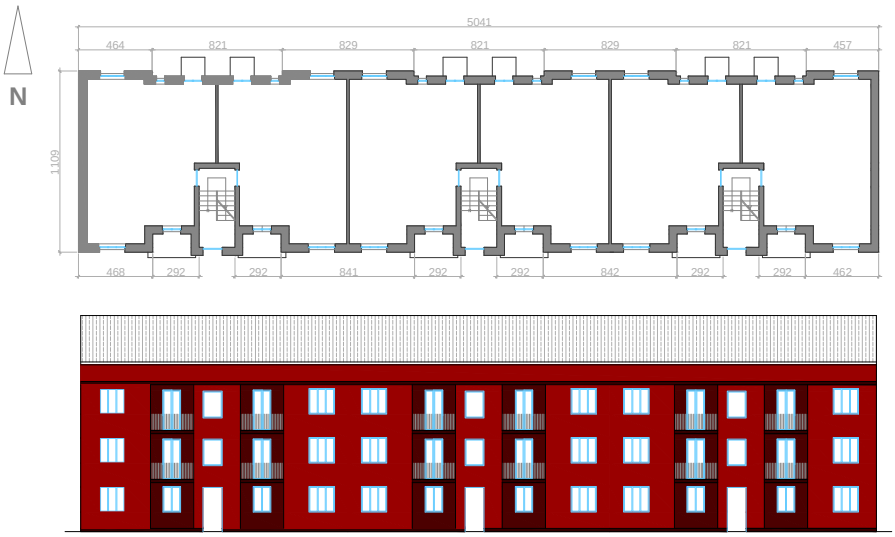



Figura 2.23. Pianta del piano tipo e prospetto lato Sud dell'edificio oggetto di studio

Al fine di analizzare l'incidenza dei ponti termici sul coefficiente di scambio termico globale e sul fabbisogno di energia termica, lo stesso edificio è stato analizzato per tre diverse configurazioni di involucro, ovvero per

- isolamento a cappotto
- isolamento nell'intercapedine
- isolamento sul lato interno

I ponti termici individuati e le rispettive lunghezze medie sono riportati in tabella 2.16.

Tabella 2.16. Individuazione dei ponti termici nel caso di studio

| Descrizione | Lunghezza [m] |
|---|---|
| Giunto parete – copertura | 125 |
| Giunto parete – balcone | 60 |
| Angolo convesso tra pareti | 95 |
| Angolo concavo tra pareti | 55 |
| Giunto parete – solaio interpiano | 180 |
| Giunto parete – solaio controterra | 125 |
| Giunto parete – telaio | 530 |
| Giunto parete – pilastro | 140 |

Per quanto riguarda il caso con isolamento a cappotto, oltre al caso di studio "base", è stata considerata una variante con correzione del ponte termico in corrispondenza dei serramenti (ponte termico più importante in termini di lunghezza) ed una seconda variante che differisce dalla seconda per l'aggiunta di una struttura portante intelaiata in calcestruzzo (scelta che comporta l'aggiunta di ponti termici in prossimità dei pilastri).

Per quanto riguarda il caso di studio con isolamento nell'intercapedine si sono considerato considerate tre varianti:

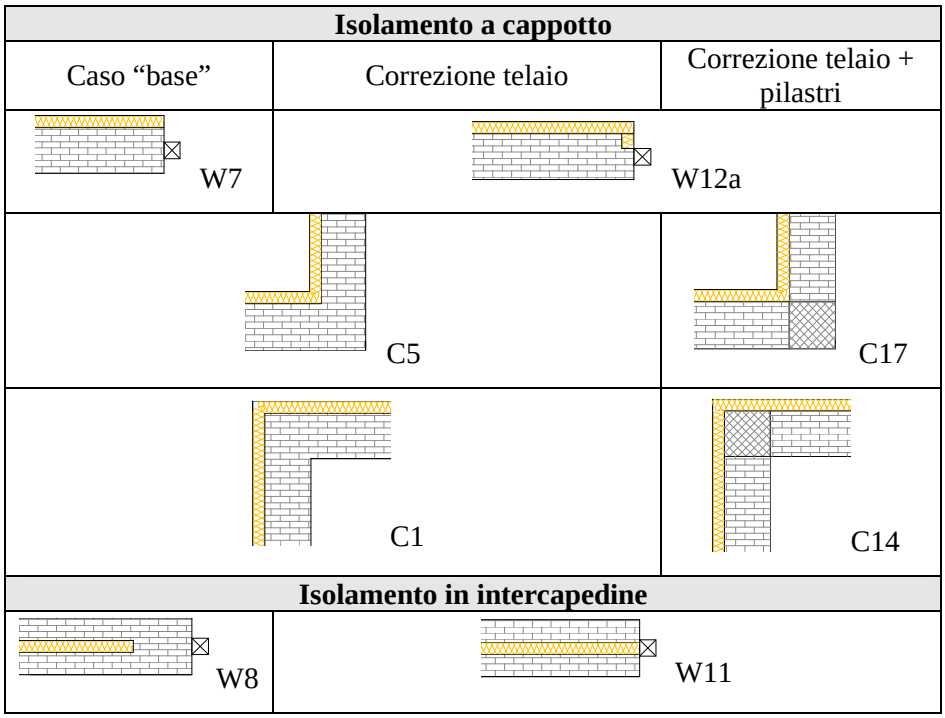
- un caso "base" che prevede per motivi tecnologici una struttura portante puntuale in calcestruzzo;

- una variante che prevede la minimizzazione dei ponti termici tra parete e serramento, in prossimità dei pilastri, del solaio interpiano e degli angoli tra pareti;
- una seconda variante che prevede una modalità diversa di minimizzazione del ponte termico in prossimità dei pilastri.

Al pari del caso con isolamento a cappotto, il caso con isolamento interno prevede un caso "base", una variante con correzione in prossimità dei serramenti ed una variante con l'inserimento della struttura in calcestruzzo e quindi dei ponti termici in prossimità dei pilastri. Si veda in tabella 2.17 i ponti termici esaminati per ogni caso di studio secondo i codici riportati in tabella 2.2 nel paragrafo 2.4. In figura 2.24 sono invece riportati i ponti termici le cui configurazioni variano da un caso all'altro, in assenza e in presenza di correzione termica e con o senza pilastro.

Tabella 2.17 Riepilogo dei casi di studio analizzati e relativi ponti termici

| **Isolamento a cappotto** | | | **Isolamento ad intercapedine** | | | **Isolamento interno** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Caso base** | **Corr. telaio** | **Corr. telaio+pilastri** | **Caso base** | **Corr.1** | **Corr.2** | **Caso base** | **Corr. telaio** | **Corr. telaio+pilastri** |
| W7 | W12a | W12a | W8 | W11 | W11 | W9 | W12 | W12 |
| GF5 | GF5 | GF5 | GF6 | GF6 | GF6 | GF7 | GF7 | GF7 |
| IF1 | IF1 | IF1 | IF2 | IF5 | IF5 | IF3 | IF3 | IF3 |
| C5 | C5 | C17 | C18 | C19 | C19 | C7 | C7 | C9 |
| C1 | C1 | C14 | C10 | C11 | C11 | C3 | C3 | C22 |
| B1 | B1 | B1 | B2 | B2 | B2 | B3 | B3 | B3 |
| R5 | R5 | R5 | R6 | R6 | R6 | R7 | R7 | R7 |
| | | P5 | P2 | P7 | P9 | | | P6 |



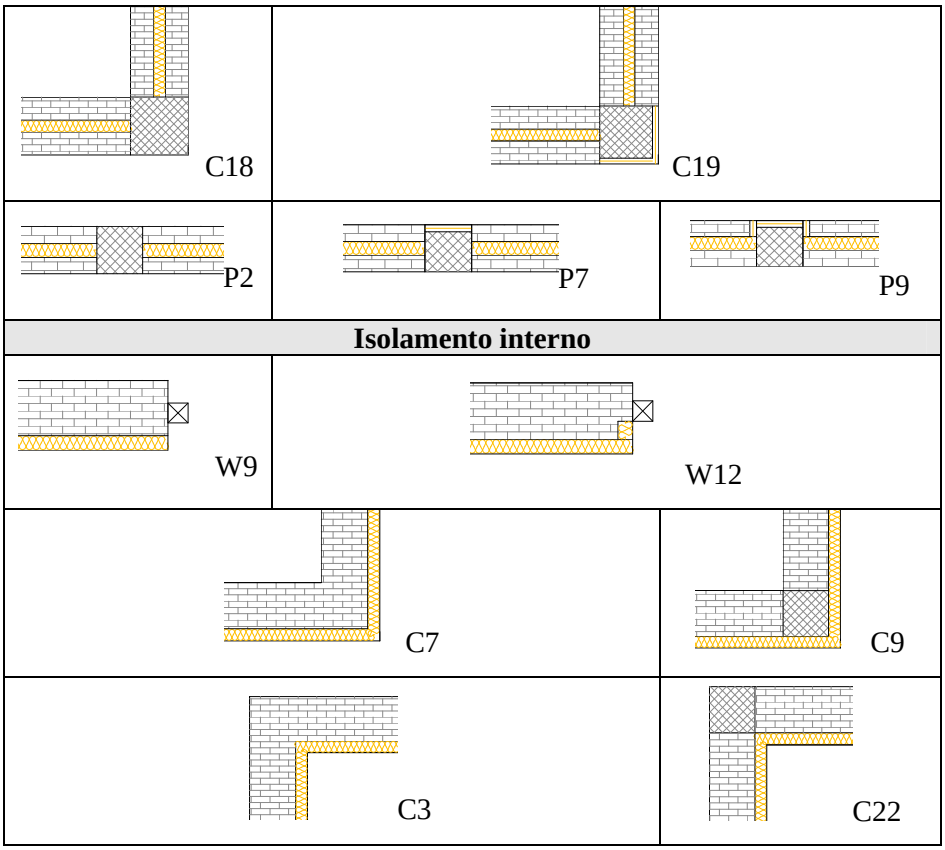



Figura 2.24. Ponti termici relativi ai casi di studio "base" con individuazione delle varianti progettuali per la loro minimizzazione o la rispettiva configurazione in presenza di struttura portante in calcestruzzo.

Per ogni caso di studio si sono effettuati 36 diversi calcoli al variare dei parametri progettuali indicati in tabella 2.18. Il calcolo delle dispersioni di calore attraverso i ponti termici, qualora risultasse possibile, è stato eseguito sia secondo la UNI EN ISO 14683 sia secondo il metodo dettagliato specificato nella UNI EN ISO 10211. È chiaro che i valori di $\psi$ relativi ad ogni ponte termico per ogni caso di studio analizzato variano se si effettua il calcolo dettagliato secondo UNI EN ISO 10211, mentre rimangono costanti, pari al valore precalcolato, se si effettua il calcolo secondo la UNI EN ISO 14683.

Ne consegue che per ogni caso di studio analizzato si ottengono 36 valori diversi di $\psi$ per ponte termico con calcolo dettagliato e un solo valore precalcolato di $\psi$ semplificata con la procedura semplificata.

Tabella 2.18. Parametri geometrici e fisico-tecnici relativi a ciascuna simulazione

| **Simulazione** | $U_{par}$ | $\lambda_{mur}$ | **Isolamento a cappotto/interno** $S_{mur}$ | **Isolamento ad intercapedine** $S_{mur}$ | $S_{sol}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| | **[W/m²K]** | **[W/m K]** | **[cm]** | **[cm]** | **[cm]** |
| 1 | 0,50 | 0,25 | 30 | 25-10 | 20 |
| 2 | 0,50 | 0,50 | 30 | 25-10 | 20 |
| 3 | 0,50 | 0,90 | 30 | 25-10 | 20 |
| 4 | 0,50 | 0,25 | 40 | 10-25 | 20 |

| Simulazione | $U_{par}$ | $\lambda_{mur}$ | Isolamento a cappotto/interno $S_{mur}$ | Isolamento ad intercapedine $S_{mur}$ | $S_{sol}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| | [W/m²K] | [W/m K] | [cm] | [cm] | [cm] |
| 5 | 0,50 | 0,50 | 40 | 10-25 | 20 |
| 6 | 0,50 | 0,90 | 40 | 10-25 | 20 |
| 7 | 0,50 | 0,25 | 30 | 25-10 | 25 |
| 8 | 0,50 | 0,50 | 30 | 25-10 | 25 |
| 9 | 0,50 | 0,90 | 30 | 25-10 | 25 |
| 10 | 0,50 | 0,25 | 40 | 10-25 | 25 |
| 11 | 0,50 | 0,50 | 40 | 10-25 | 25 |
| 12 | 0,50 | 0,90 | 40 | 10-25 | 25 |
| 13 | 0,30 | 0,25 | 30 | 25-10 | 20 |
| 14 | 0,30 | 0,50 | 30 | 25-10 | 20 |
| 15 | 0,30 | 0,90 | 30 | 25-10 | 20 |
| 16 | 0,30 | 0,25 | 40 | 10-25 | 20 |
| 17 | 0,30 | 0,50 | 40 | 10-25 | 20 |
| 18 | 0,30 | 0,90 | 40 | 10-25 | 20 |
| 19 | 0,30 | 0,25 | 30 | 25-10 | 25 |
| 20 | 0,30 | 0,50 | 30 | 25-10 | 25 |
| 21 | 0,30 | 0,90 | 30 | 25-10 | 25 |
| 22 | 0,30 | 0,25 | 40 | 10-25 | 25 |
| 23 | 0,30 | 0,50 | 40 | 10-25 | 25 |
| 24 | 0,30 | 0,90 | 40 | 10-25 | 25 |
| 25 | 0,10 | 0,25 | 30 | 25-10 | 20 |
| 26 | 0,10 | 0,50 | 30 | 25-10 | 20 |
| 27 | 0,10 | 0,90 | 30 | 25-10 | 20 |
| 28 | 0,10 | 0,25 | 40 | 10-25 | 20 |
| 29 | 0,10 | 0,50 | 40 | 10-25 | 20 |
| 30 | 0,10 | 0,90 | 40 | 10-25 | 20 |
| 31 | 0,10 | 0,25 | 30 | 25-10 | 25 |
| 32 | 0,10 | 0,50 | 30 | 25-10 | 25 |
| 33 | 0,10 | 0,90 | 30 | 25-10 | 25 |
| 34 | 0,10 | 0,25 | 40 | 10-25 | 25 |
| 35 | 0,10 | 0,50 | 40 | 10-25 | 25 |
| 36 | 0,10 | 0,90 | 40 | 10-25 | 25 |

Si riportano nelle pagine che seguono i risultati in termini di coefficienti di scambio termico per trasmissione e di fabbisogno per ogni caso analizzato. Il confronto tra metodologie è presente solo nel caso in cui i ponti termici individuati siano anche presenti all'interno dell'appendice A della norma UNI EN ISO 14683.

In particolare, per ogni caso di studio individuato sono forniti grafici che, nell'ordine, analizzano i seguenti aspetti:

- il coefficiente di scambio termico per dispersione di ciascun ponte termico [W/K] sul coefficiente di scambio termico per trasmissione attraverso il totale dei ponti termici [W/K] al fine di individuare quali ponti termici incidono maggiormente sulle dispersioni per trasmissione;
- il coefficiente di scambio termico per trasmissione [W/K] suddiviso nelle quote relative alle dispersioni attraverso l'involucro opaco dove lo scambio termico è monodimensionale, attraverso l'involucro vetrato, attraverso l'involucro adiacente a locali non climatizzati, di componenti a contatto con il terreno e attraverso i ponti termici;

- il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento [kWh/m$^2$] e l'energia termica dispersa attraverso i ponti termici [kWh/m$^2$].

Infine, all'interno di una tabella vengono individuati valore medio, deviazione standard, valore minimo e valore massimo relativi al fabbisogno di energia termica per il riscaldamento [kWh/m$^2$].

Dall'analisi dei seguenti risultati per ogni caso di studio e conseguentemente all'analisi di sensibilità svolta all'interno del paragrafo 2.6 per i singoli ponti termici, è stato possibile individuare i seguenti aspetti:

- quali ponti termici incidono maggiormente sulle dispersioni termiche per trasmissione e sul fabbisogno di energia termica per riscaldamento per ogni caso di studio analizzato;
- quali ponti termici sono caratterizzati da valori di $\psi$ fortemente variabili in funzione dei parametri di ingresso.

Una volta individuati tali ponti termici è stato possibile, grazie alle analisi di sensibilità svolte, individuare quale parametro progettuale (tabella 2.18) risulta maggiormente influente sulla variazione del fabbisogno di energia termica in periodo invernale.

Nei casi in cui è stato possibile effettuare il confronto tra metodologie di calcolo (UNI EN ISO 10211 e UNI EN ISO 14683) si è potuto evidenziare come il calcolo semplificato delle trasmittanze termiche lineari non permetta di apprezzare l'influenza dei singoli parametri progettuali sulla variazione del fabbisogno e generalmente sovrastimi le dispersioni termiche.

**Isolamento a cappotto: caso “base”. Confronto tra UNI EN ISO 10211 e UNI EN ISO 14683**

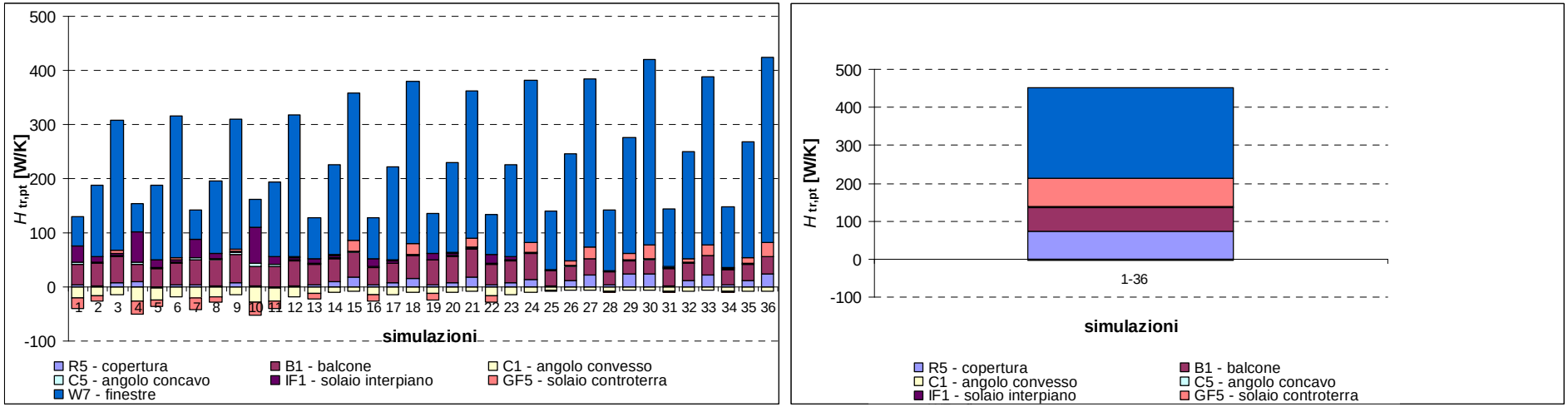



Figura 2.25. Coefficienti di scambio termico per trasmissione per singolo ponte termico: metodo dettagliato (sinistra) e semplificato (destra).

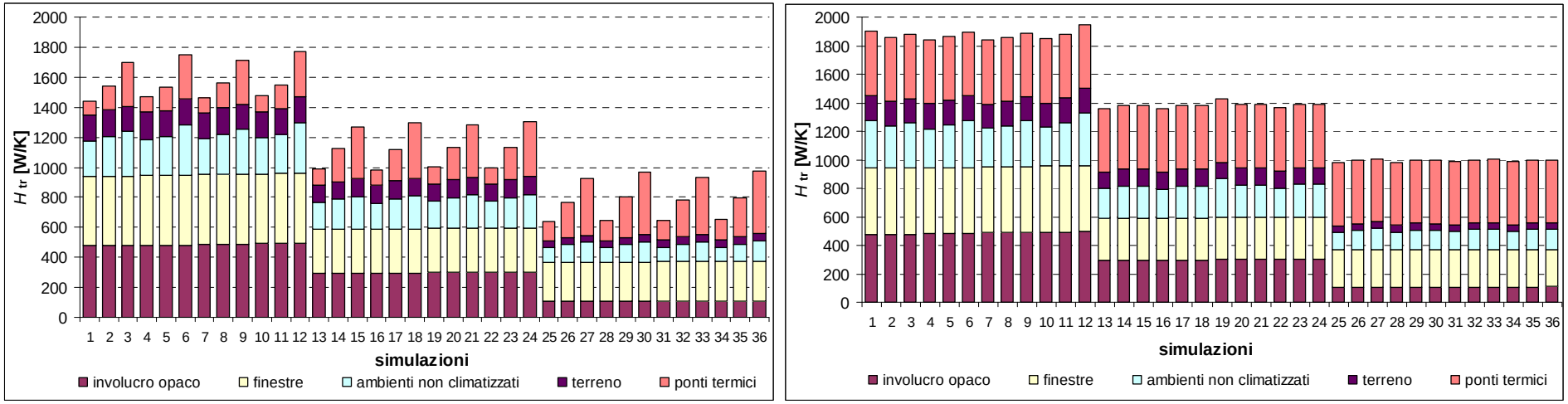



Figura 2.26 Coefficienti di scambio termico per trasmissione ($H_{tr}$): metodo dettagliato (sinistra) e semplificato (destra)

**Isolamento a cappotto: caso “base”. Confronto tra UNI EN ISO 10211 e UNI EN ISO 14683**

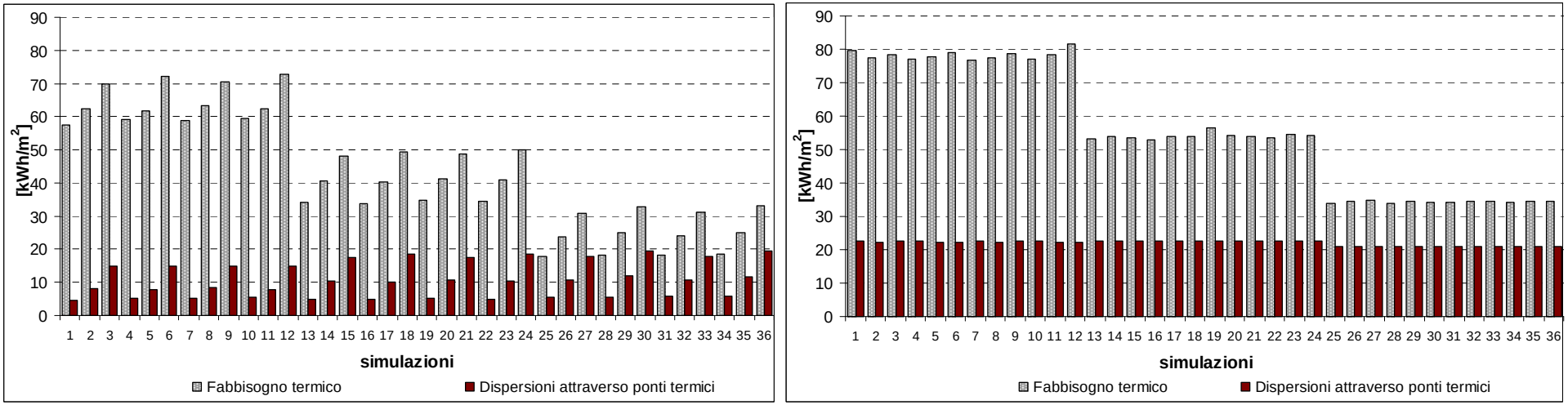



Figura 2.27. Fabbisogno di energia termica utile e incidenza delle dispersioni termiche attraverso i ponti termici: metodo dettagliato (sinistra) e semplificato (destra).

Tabella 2.19. Valore medio, minimo e massimo e deviazione standard del fabbisogno di energia termica per riscaldamento: confronto tra metodo dettagliato e semplificato.

| | $Q_{H,nd}/A$ [kWh/m$^2$] | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **MEDIA** | | **DEV. STANDARD** | | **MINIMO** | | **MASSIMO** | |
| | **UNI EN ISO 10211** | **UNI EN ISO 14683** | **UNI EN ISO 10211** | **UNI EN ISO 14683** | **UNI EN ISO 10211** | **UNI EN ISO 14683** | **UNI EN ISO 10211** | **UNI EN ISO 14683** |
| **U = 0,5 W/(m$^2$K)** | 64,2 | 78,3 | 5,6 | 1,3 | 57,5 | 76,8 | 72,9 | 81,6 |
| **U = 0,3 W/(m$^2$K)** | 41,4 | 54,0 | 6,4 | 0,9 | 33,8 | 53,0 | 50,0 | 56,5 |
| **U = 0,1 W/(m$^2$K)** | 24,9 | 34,3 | 5,9 | 0,3 | 18,0 | 33,9 | 33,1 | 34,8 |
| **Totale** | 43,5 | 55,6 | 17,3 | 18,3 | 18,0 | 33,9 | 72,9 | 81,6 |

**Isolamento a cappotto: correzione telaio. Calcolo secondo UNI EN ISO 10211**

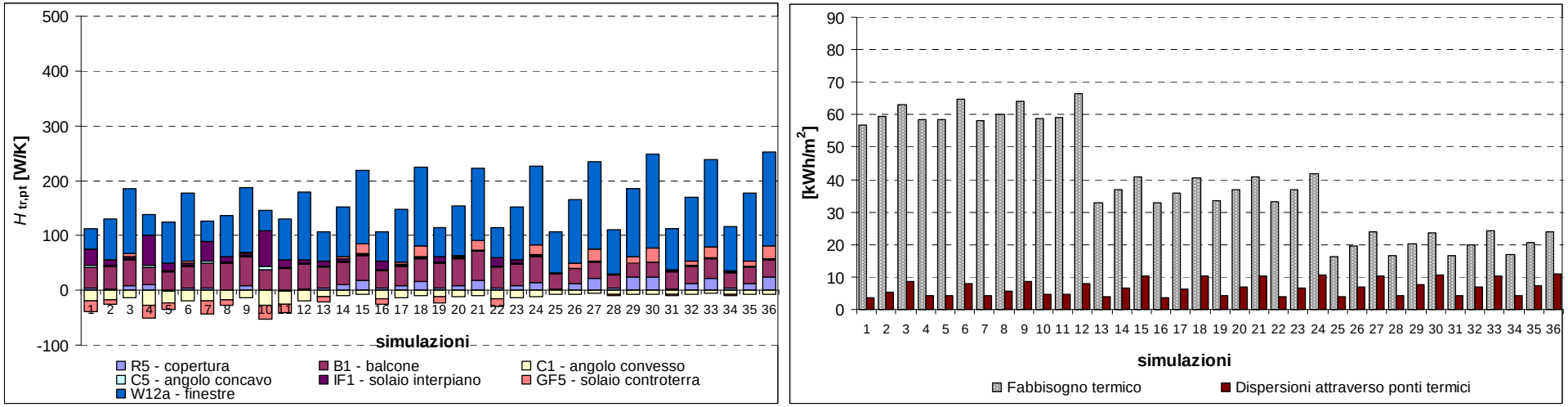



Figura 2.28. Coefficienti di scambio termico per trasmissione per singolo ponte termico (sinistra) e fabbisogno di energia termica con indicazione dell'incidenza delle dispersioni termiche attraverso i ponti termici (destra).

Tabella 2.20. Valore medio, deviazione standard, minimo e massimo dell'incidenza dei ponti termici sul fabbisogno e del fabbisogno di energia termica.

| | $Q_{H,nd}/A$ [kWh/m$^2$] | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **MEDIA** | **DEV. ST** | **MIN** | **MAX** |
| **U = 0,5 W/(m$^2$K)** | 60,6 | 3,1 | 56,6 | 66,3 |
| **U = 0,3 W/(m$^2$K)** | 37,0 | 3,4 | 32,8 | 42,0 |
| **U = 0,1 W/(m$^2$K)** | 20,2 | 3,1 | 16,3 | 24,2 |
| **Totale** | 39,3 | 17,1 | 16,3 | 66,3 |

**Isolamento a cappotto: correzione telaio e struttura portante in calcestruzzo. Calcolo secondo UNI EN ISO 10211**

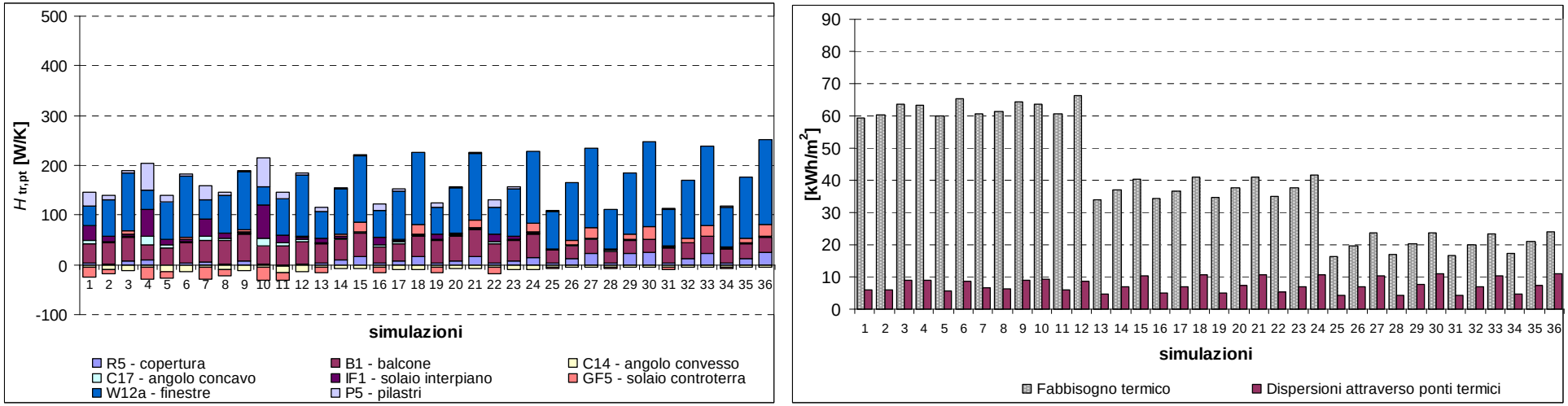



Figura 2.29. Coefficienti di scambio termico per trasmissione per singolo ponte termico (sinistra) e fabbisogno di energia termica con indicazione dell'incidenza delle dispersioni attraverso i ponti termici (destra).

Tabella 2.21. Indicazione di media, deviazione standard, minimo e massimo dell'incidenza dei ponti termici sul fabbisogno e del fabbisogno di energia termica.

| | $Q_{H,nd}/A$ [kWh/m$^2$] | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **MEDIA** | **DEV. ST** | **MIN** | **MAX** |
| **U = 0,5 W/(m$^2$K)** | 62,4 | 2,3 | 59,4 | 66,2 |
| **U = 0,3 W/(m$^2$K)** | 37,6 | 2,8 | 34,0 | 41,5 |
| **U = 0,1 W/(m$^2$K)** | 20,3 | 2,9 | 16,5 | 24,1 |
| **Totale** | 40,1 | 17,7 | 16,5 | 66,2 |

*Isolamento a cappotto: caso "base"*

Tabella 2.22. Deviazione standard dei coefficienti di scambio termico per trasmissione dei ponti termici per il caso di studio con isolamento a cappotto

| Ponti termici | Cappotto caso "base" | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **U=0,5 W/(m²K)** | **U=0,3 W/(m²K)** | **U=0,1 W/(m²K)** | **Totale** |
| | **dev.st [W/K]** | **dev.st [W/K]** | **dev.st [W/K]** | **dev.st [W/K]** |
| R5 | 3,8 | 5,6 | 9,3 | 7,7 |
| B1 | 6,3 | 5,8 | 3,3 | 8,1 |
| C1 | 4,4 | 2,3 | 0,6 | 6,0 |
| C5 | 1,1 | 0,2 | 0,0 | 1,0 |
| IF1 | 21,3 | 5,2 | 0,9 | 15,0 |
| GF5 | 11,5 | 12,7 | 10,5 | 14,1 |
| W7 | 85,0 | 90,6 | 93,2 | 91,4 |

Per quanto riguarda il caso "base" con isolamento a cappotto, si può notare in figura 2.25 (grafico a sinistra) che:

- ponte termico che ha maggiore rilevanza sulle dispersioni per trasmissione attraverso i ponti termici è il W7 (parete esterna – serramento) che pesa mediamente il 77% sulle dispersioni di calore attraverso i ponti termici essendo il ponte termico con maggiore lunghezza e valori di $\psi$ non trascurabili;
- le dispersioni termiche associate al W7 hanno una deviazione standard elevata (tabella 2.22), ovvero i valori di $\psi$ variano notevolmente al variare delle condizioni al contorno;

Pertanto il W7 risulta pertanto essere il ponte termico la cui variazione influisce maggiormente sulla variazione del fabbisogno. Dalle analisi di sensibilità descritte all'interno del paragrafo 2.6 emerge che il parametro la cui variazione maggiormente influenza la variazione di $\psi$ per tale ponte termico è la conducibilità termica di parete (tabella 2.9), che risulta pertanto essere anche il parametro che maggiormente influenza la variazione del fabbisogno di energia termica a parità di trasmittanza media di involucro, e quindi di dispersioni energia per trasmissione al netto di quella attraverso i ponti termici.

Per lo stesso caso di studio, con dispersioni attraverso i ponti termici analizzate attraverso la UNI EN ISO 14683, non si nota invece la variazione del fabbisogno al variare di parametri di ingresso diversi dalla trasmittanza termica di parete essendo la $\psi$ indipendente da tali parametri. Il fabbisogno, oltre ad essere mediamente maggiore rispetto allo stesso calcolato con metodo dettagliato (55,6 kWh/m$^2$ contro i 43,5 kWh/m$^2$) presenta valori di deviazione standard molto bassi al pari di trasmittanza termica (da 0,3 a 1,3 kWh/m$^2$) dovuti esclusivamente alla lieve variazione delle grandezze in gioco (geometria delle strutture e quindi superficie disperdente, capacità areica interna ecc.) (tabella 2.19).

Infine, dal confronto tra le metodologie, emerge in particolare la diversa incidenza percentuale dei ponti termici sul fabbisogno: l'incidenza media secondo un calcolo dettagliato è di circa il 28%, variando dall'8% al 21% per $U_m$ = 0,5 W/(m$^2$K), dal14% al 37% per $U_m$ = 0,3 W/(m$^2$K), dal 31% al 59% per $U_m$ = 0,1 W/(m$^2$K), mentre secondo metodo semplificato è complessivamente del 44%,

essendo mediamente 28% per $U_m$ = 0,5 W/(m$^2$K), 42% per $U_m$ = 0,3 W/(m$^2$K) e 61% per $U_m$ = 0,1 W/(m$^2$K).

*Isolamento a cappotto: correzione telaio*

Per quanto riguarda il caso di studio con isolamento a cappotto e correzione del ponte termico adiacente agli infissi, tale correzione rende evidente il peso che gli altri ponti termici hanno sul fabbisogno, nonostante mediamente il ponte termico W12a resti il più importante (figura 2.28).

I ponti termici che pesano maggiormente sulle dispersioni per trasmissione attraverso i ponti termici sono:

- W12a (parete esterna – serramento con correzione) che incide mediamente il 67%;
- B1 (parete esterna – balcone) che incide mediamente il 29%;
- IF1 (parete esterna – solaio interpiano) che incide mediamente il 10%.

Il parametro la cui variazione indice maggiormente sulla variazione delle dispersioni termiche nonché sul fabbisogno rimane la conducibilità della parete perché il ponte termico W12a è notevolmente influenzato da tale parametro (tabella 2.9), ma è evidente come il ponte termico IF1 pesi molto più per bassi spessori di isolante a parete nonché per trasmittanze termiche più elevate (per valori di $U_m$ = 0,1 W/(m$^2$K) il ponte termico IF1 presenta valori molto bassi di $\psi$ tali da non influenzare più le dispersioni termiche).

*Isolamento a cappotto: correzione telaio e struttura portante in calcestruzzo*

Analizzando il caso di studio con struttura portante intelaiata in calcestruzzo, non si notano differenze elevate rispetto al caso precedente, se non per la presenza del ponte termico P5 in corrispondenza dei pilastri che pesa notevolmente per bassi valori di isolamento termico a parete e per valori di trasmittanza termica elevata ma mediamente con ridotta influenza sulle dispersioni attraverso i ponti termici (6% circa).

**Isolamento ad intercapedine: caso “base”. Calcolo secondo UNI EN ISO 10211**

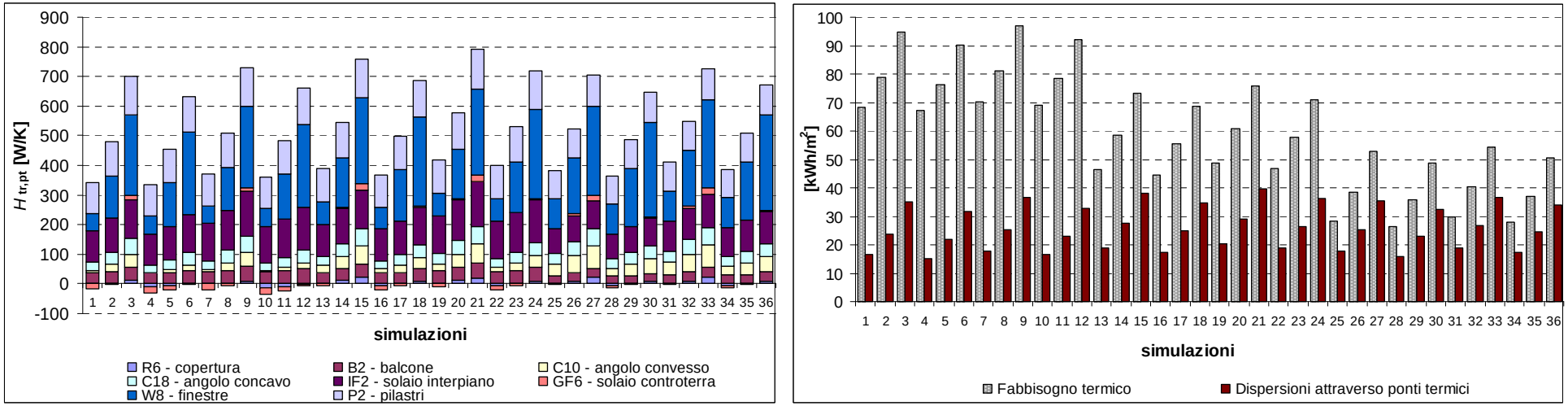



Figura 2.30. Coefficienti di scambio termico per trasmissione per singolo ponte termico (sinistra) e fabbisogno di energia termica con indicazione dell’incidenza delle dispersioni attraverso i ponti termici (destra).

Tabella 2.23. Indicazione di media, deviazione standard, minimo e massimo dell’incidenza dei ponti termici sul fabbisogno e del fabbisogno di energia termica.

| | $Q_{H,nd}/A$ [kWh/m$^2$] | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **MEDIA** | **DEV. ST** | **MIN** | **MAX** |
| **U = 0,5 W/(m$^2$K)** | 80,3 | 10,8 | 67,2 | 96,9 |
| **U = 0,3 W/(m$^2$K)** | 59,0 | 11,1 | 44,6 | 75,8 |
| **U = 0,1 W/(m$^2$K)** | 39,2 | 10,3 | 26,5 | 54,4 |
| **Totale** | 59,5 | 19,9 | 26,5 | 96,9 |

**Isolamento ad intercapedine: correzione 1. Calcolo secondo UNI EN ISO 10211**

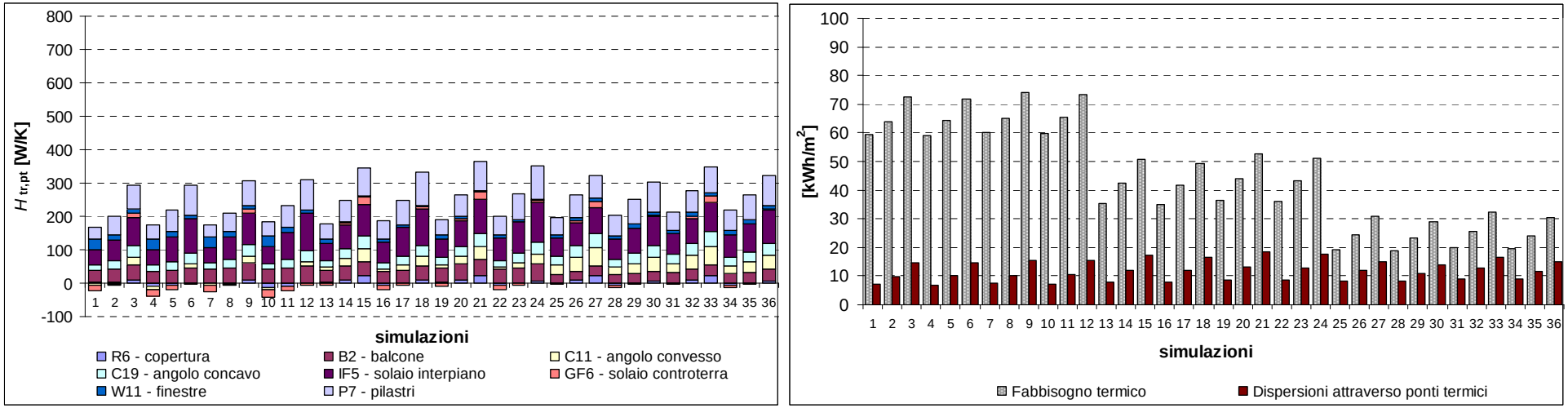



Figura 2.31. Coefficienti di scambio termico per trasmissione per singolo ponte termico (sinistra) e fabbisogno di energia termica con indicazione dell'incidenza delle dispersioni attraverso i ponti termici (destra).

Tabella 2.24. Indicazione di media, deviazione standard, minimo e massimo dell'incidenza dei ponti termici sul fabbisogno e del fabbisogno di energia termica.

| | $Q_{H,nd}/A$ [kWh/m$^2$] | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **MEDIA** | **DEV. ST** | **MIN** | **MAX** |
| **U = 0,5 W/(m$^2$K)** | 65,7 | 5,8 | 58,9 | 74,0 |
| **U = 0,3 W/(m$^2$K)** | 43,1 | 6,5 | 35,0 | 52,5 |
| **U = 0,1 W/(m$^2$K)** | 24,8 | 4,9 | 18,7 | 32,5 |
| **Totale** | 44,5 | 17,9 | 18,7 | 74,0 |

**Isolamento ad intercapedine: correzione 2. Calcolo secondo UNI EN ISO 10211**

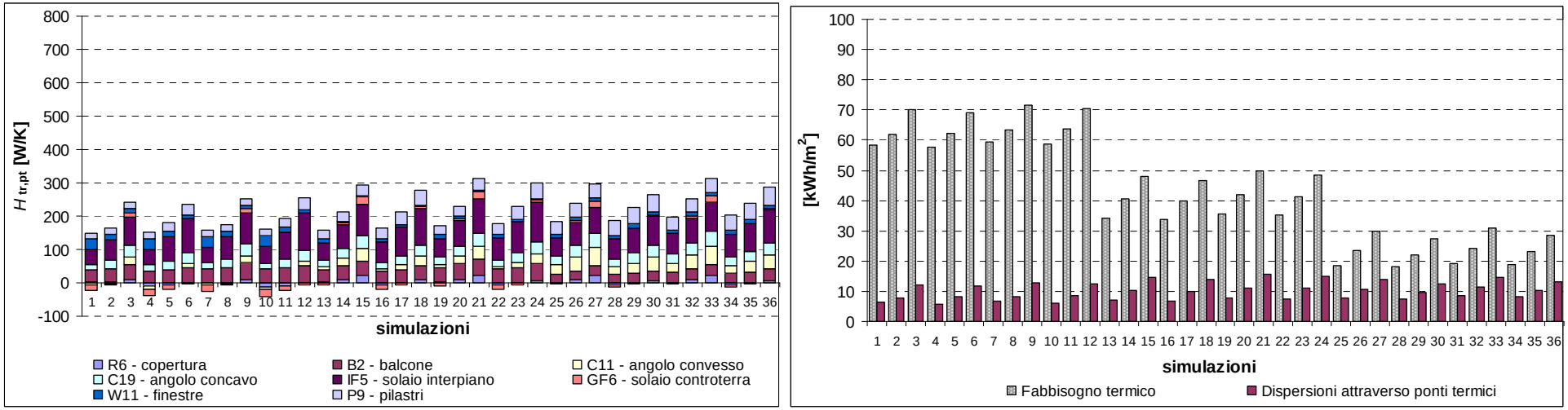



Figura 2.32. Coefficienti di scambio termico per trasmissione per singolo ponte termico (sinistra) e fabbisogno di energia termica con indicazione dell'incidenza delle dispersioni attraverso i ponti termici (destra).

Tabella 2.25. Indicazione di media, deviazione standard, minimo e massimo dell'incidenza dei ponti termici sul fabbisogno e del fabbisogno di energia termica.

| | $Q_{H,nd}/A$ [kWh/m$^2$] | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **MEDIA** | **DEV. ST** | **MIN** | **MAX** |
| **U = 0,5 W/(m$^2$K)** | 63,9 | 5,1 | 57,8 | 71,4 |
| **U = 0,3 W/(m$^2$K)** | 41,3 | 5,8 | 33,9 | 49,9 |
| **U = 0,1 W/(m$^2$K)** | 23,7 | 4,6 | 18,0 | 30,8 |
| **Totale** | 42,9 | 17,5 | 18,0 | 71,4 |

*Isolamento ad intercapedine: caso "base"*

Tabella 2.26. Deviazione standard dei coefficienti di scambio termico per trasmissione dei ponti termici per il caso di studio con isolamento ad intercapedine

| Ponti termici | Intercapedine caso "base" | | | |
|---|---|---|---|---|
| | U=0,5 W/(m$^2$K) | U=0,3 W/(m$^2$K) | U=0,1 W/(m$^2$K) | Totale |
| | dev.st [W/K] | dev.st [W/K] | dev.st [W/K] | dev.st [W/K] |
| R6 | 7,6 | 9,3 | 9,3 | 9,2 |
| B2 | 4,8 | 4,5 | 2,8 | 7,8 |
| C10 | 15,1 | 16,7 | 15,9 | 20,2 |
| C18 | 10,1 | 10,3 | 9,2 | 9,8 |
| IF2 | 14,8 | 14,1 | 10,1 | 18,9 |
| GF6 | 11,8 | 12,2 | 9,5 | 11,9 |
| W8 | 92,9 | 93,9 | 89,4 | 91,0 |
| P2 | 8,9 | 8,5 | 4,2 | 12,1 |

Per quanto riguarda il caso "base" con isolamento in intercapedine, i ponti termici che pesano maggiormente sulle dispersioni per trasmissione attraverso i ponti termici sono, nell'ordine

- W8 (parete esterna – serramento) che indice mediamente il 32%;
- l'IF2 (parete esterna – solaio interpiano) che indice mediamente il 24%;
- P2 (parete esterna – pilastro) che indice mediamente il 23%.

I parametri progettuali maggiormente influenti sono

- la conducibilità della parete che influenza la $\psi$ del W8 (tabella 2.11)
- lo spessore di isolante a parete che influenza il ponte termico IF2 e, solo in maniera marginale il P2 (tabella 2.11).

Il valore medio di fabbisogno è mediamente maggiore rispetto al caso studio con isolamento a cappotto (59,5 kWh/m$^2$ rispetto a 43,5 kWh/$^2$) mentre la sua deviazione standard è simile (20 kWh/m$^2$ rispetto a 17,3 kWh/m$^2$).

I ponti termici pesano mediamente di più rispetto al caso con isolamento a cappotto: 47% rispetto a 28% variando da 23% a 38% per $U_m$ = 0,5 W/(m$^2$K), da 39% a 52% per $U_m$ = 0,3 W/(m$^2$K), da 60% a 67% per $U_m$ = 0,1 W/(m$^2$K).

*Isolamento ad intercapedine: correzione 1 e correzione 2*

Le "correzioni 1 e 2" apportate al fine di minimizzare le dispersioni attraverso i ponti termici sono state apportate ai pilastri d'angolo, ai serramenti, ai giunti parete esterna – solaio interpiano e in prossimità dei pilastri su parete piana. La differenza tra i due tipi di correzione riguarda la correzione del pilastro che prevede nel primo caso l'inserimento di uno spessore di isolante termico sul lato esterno del pilastro e nel secondo caso l'incapsulamento del pilastro con materiale isolante. Dopo la "correzione 1", i ponti termici più importanti diventano

- IF5 (parete esterna – solaio interpiano)
- P7 (parete esterna - pilastro)
- B2 (parete esterna – balcone)

I parametri progettuali maggiormente influenti sono

- lo spessore di isolante a parete
- la conducibilità della muratura
- lo spessore del solaio (tabella 2.11).

In analogia alla "correzione 1", i ponti termici che pesano maggiormente sulle dispersioni attraverso i ponti termici per il caso "correzione 2" sono (figura 2.31)

- IF5 (parete esterna – solaio interpiano)
- B2 (parete esterna – balcone)
- P9 (parete esterna - pilastro)

In termini di fabbisogno, la "correzione 1" comporta una riduzione media del fabbisogno pari al 25%, ovvero da 69,5 kWh/m$^2$ a 44,5 kWh/m$^2$ mentre la "correzione 2" pari al 28%, ovvero da 69,5 kWh/m$^2$ a 42,9 kWh/m$^2$.

I ponti termici pesano mediamente di meno rispetto al caso base: 30,8% per la "correzione 1" e 28% per la "correzione 2" rispetto a 47%.

**Isolamento interno: caso “base”. Confronto tra UNI EN ISO 10211 e UNI EN ISO 14683**

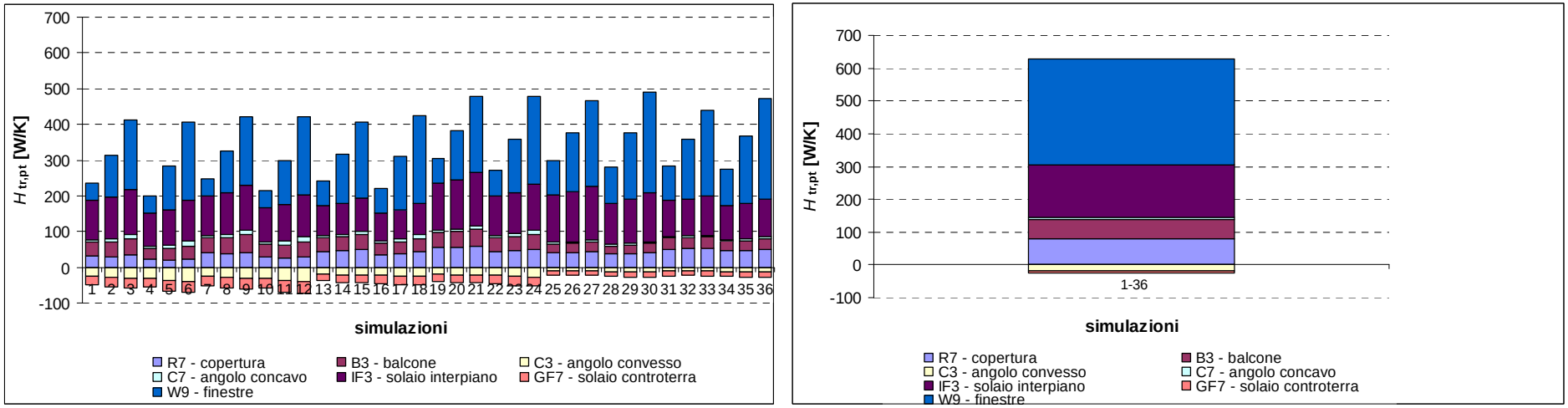



Figura 2.33. Coefficienti di scambio termico per trasmissione per singolo ponte termico: metodo dettagliato (sinistra) e semplificato (destra).

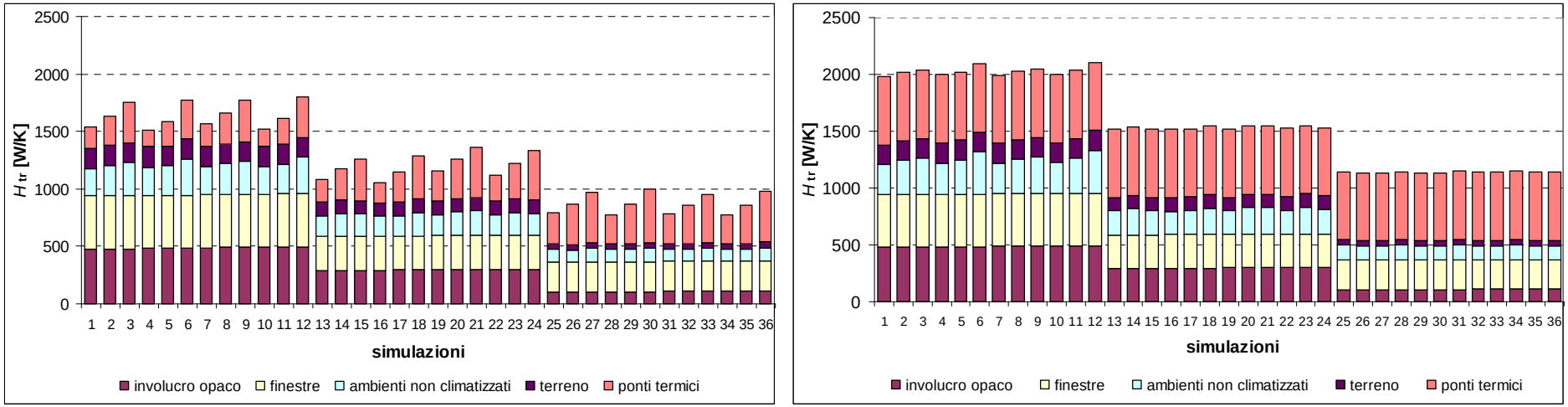



Figura 2.34. Coefficienti di scambio termico per trasmissione: metodo dettagliato (sinistra) e semplificato (destra).

**Isolamento interno: caso “base”. Confronto tra UNI EN ISO 10211 e UNI EN ISO 14683**

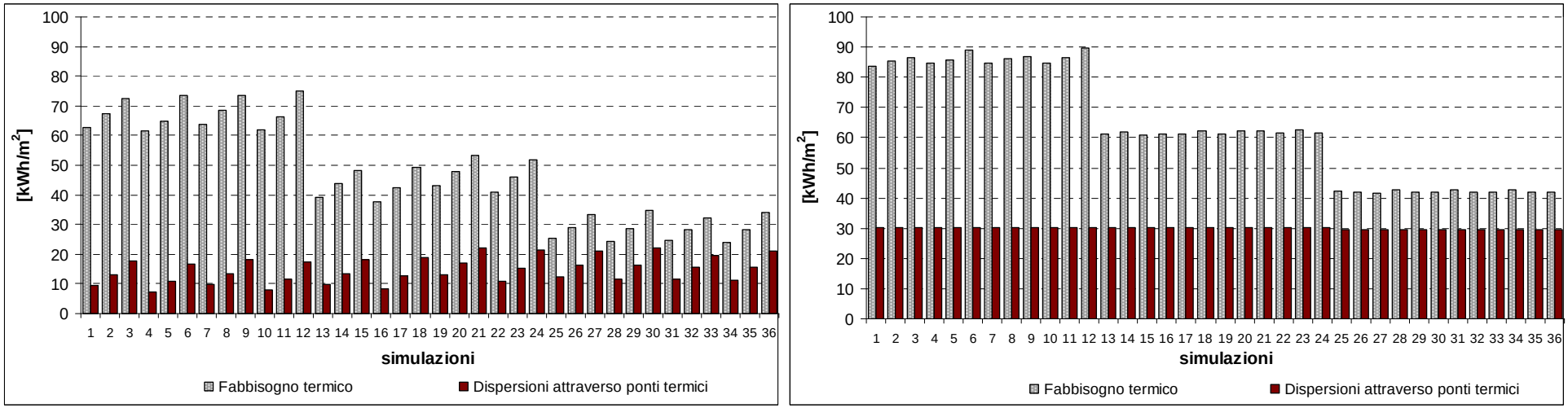



Figura 2.35. Fabbisogno di energia termica e incidenza delle dispersioni attraverso i ponti termici: metodo dettagliato (sinistra) e semplificato (destra).

Tabella 2.27. Indicazione di media, deviazione standard, minimo e massimo dell’incidenza dei ponti termici sul fabbisogno e del fabbisogno di energia termica: confronto tra metodo dettagliato e semplificato.

| | $Q_{H,nd}/A$ [kWh/m$^2$] | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **MEDIA** | | **DEV. STANDARD** | | **MIN** | | **MAX** | |
| | **10211** | **14683** | **10211** | **14683** | **10211** | **14683** | **10211** | **14683** |
| **U = 0,5 W/(m$^2$K)** | 67,6 | 86,2 | 5,0 | 1,8 | 61,4 | 83,8 | 74,9 | 89,8 |
| **U = 0,3 W/(m$^2$K)** | 45,3 | 61,6 | 5,0 | 0,6 | 37,7 | 60,9 | 53,4 | 62,6 |
| **U = 0,1 W/(m$^2$K)** | 29,0 | 42,1 | 3,9 | 0,3 | 24,1 | 41,8 | 34,8 | 42,7 |
| **Totale** | 47,3 | 63,3 | 16,7 | 18,3 | 24,1 | 41,8 | 74,9 | 89,8 |

**Isolamento interno: correzione telaio. Confronto tra UNI EN ISO 10211 e UNI EN ISO 14683**

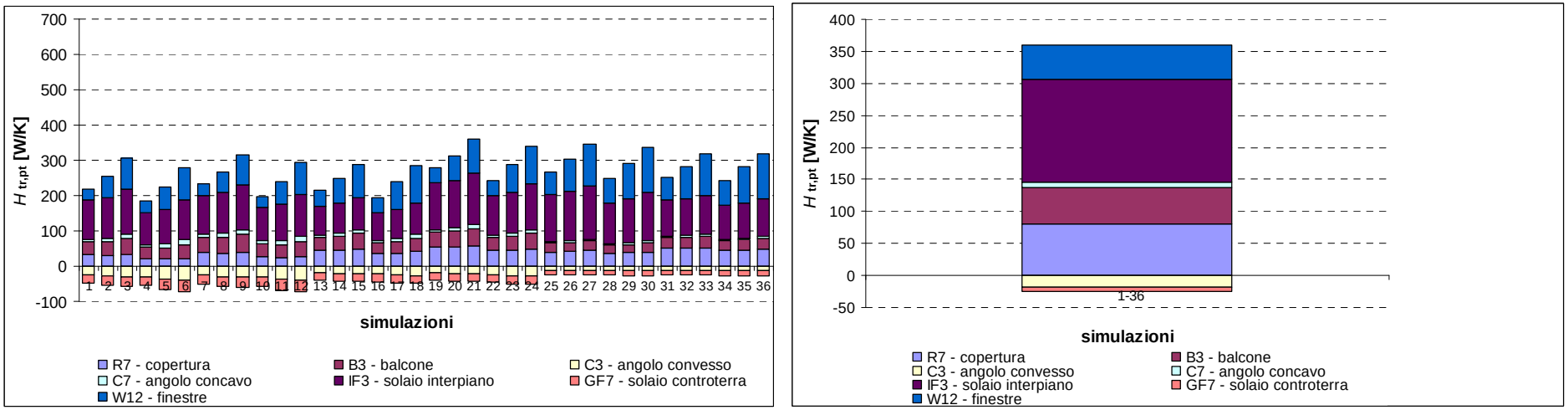



Figura 2.36. Coefficienti di scambio termico per trasmissione per singolo ponte termico: metodo dettagliato (sinistra) e semplificato (destra).

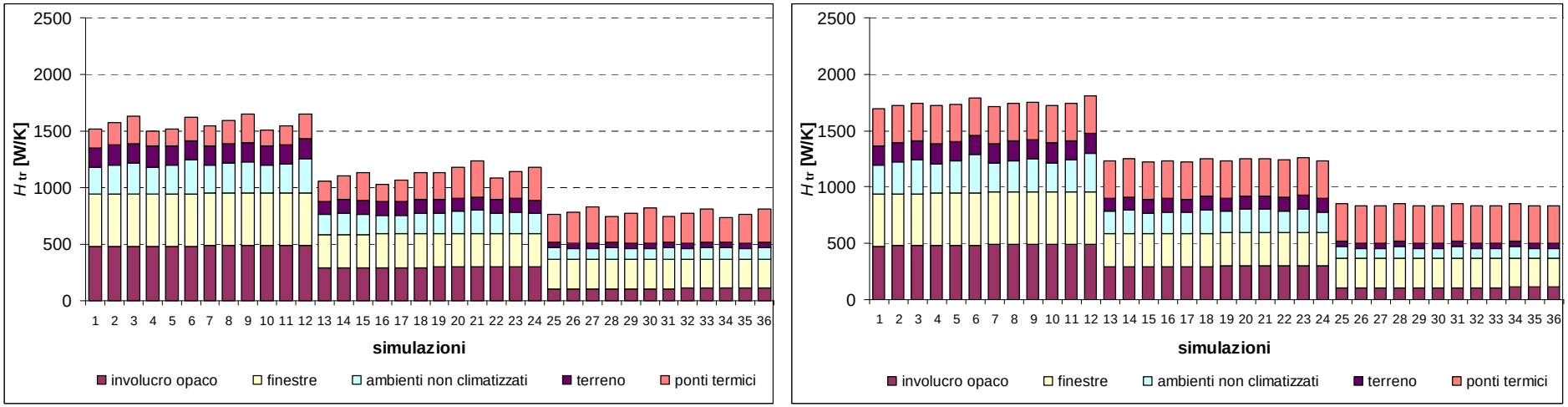



Figura 2.37. Coefficienti di scambio termico per trasmissione: metodo dettagliato (sinistra) e semplificato (destra).

**Isolamento interno: correzione telaio. Confronto tra UNI EN ISO 10211 e UNI EN ISO 14683**

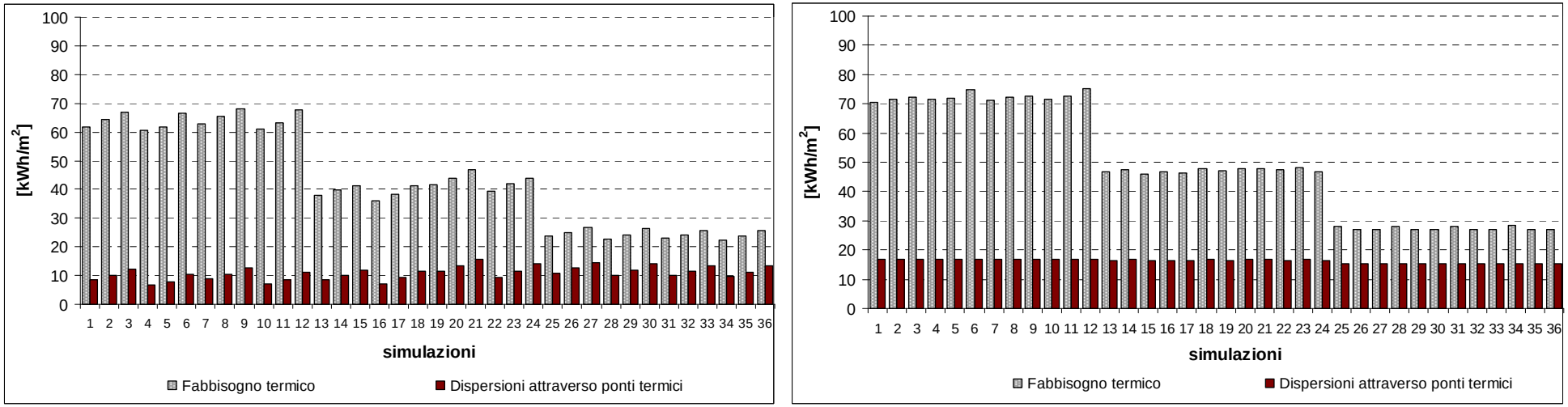



Figura 2.38. Fabbisogno di energia termica e incidenza delle dispersioni attraverso i ponti termici: metodo dettagliato (sinistra) e semplificato (destra).

Tabella 2.28. Indicazione di media, deviazione standard, minimo e massimo dell'incidenza dei ponti termici sul fabbisogno e del fabbisogno di energia termica: confronto tra metodo dettagliato e semplificato.

| | $Q_{H,nd}/A$ [kWh/m$^2$] | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **MEDIA** | | **DEV. STANDARD** | | **MIN** | | **MAX** | |
| | **10211** | **14683** | **10211** | **14683** | **10211** | **14683** | **10211** | **14683** |
| **U = 0,5 W/(m$^2$K)** | 64,1 | 72,3 | 2,7 | 1,4 | 60,6 | 70,3 | 68,0 | 75,3 |
| **U = 0,3 W/(m$^2$K)** | 41,0 | 47,2 | 2,9 | 0,6 | 36,2 | 46,1 | 46,7 | 48,1 |
| **U = 0,1 W/(m$^2$K)** | 24,4 | 27,4 | 1,5 | 0,6 | 22,4 | 26,8 | 26,9 | 28,3 |
| **Totale** | 43,2 | 48,9 | 16,7 | 18,7 | 22,4 | 26,8 | 68,0 | 75,3 |

**Isolamento interno: correzione telaio e struttura portante in calcestruzzo. Calcolo secondo UNI EN ISO 10211**

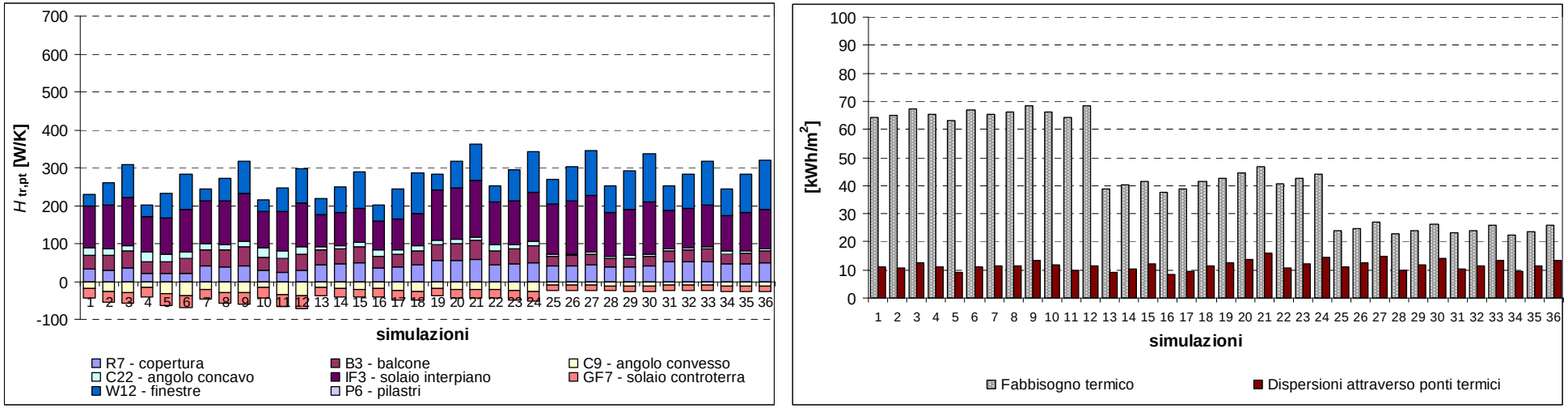



Figura 2.39. Coefficienti di scambio termico per trasmissione per singolo ponte termico (sinistra) e fabbisogno di energia termica con indicazione dell'incidenza delle dispersioni attraverso i ponti termici (destra).

Tabella 2.29. Indicazione di media, deviazione standard, minimo e massimo dell'incidenza dei ponti termici sul fabbisogno e del fabbisogno di energia termica.

| | $Q_{H,nd}/A$ [kWh/m$^2$] | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **MEDIA** | **DEV. ST** | **MIN** | **MAX** |
| **U = 0,5 W/(m$^2$K)** | 65,9 | 1,6 | 63,1 | 68,3 |
| **U = 0,3 W/(m$^2$K)** | 41,6 | 2,7 | 37,6 | 46,8 |
| **U = 0,1 W/(m$^2$K)** | 24,5 | 1,4 | 22,6 | 26,9 |
| **Totale** | 44,0 | 17,3 | 22,6 | 68,3 |

*Isolamento interno: caso "base"*

Tabella 2.30. Deviazione standard dei coefficienti di scambio termico per trasmissione dei ponti termici per il caso di studio con isolamento interno.

| Ponti termici | Interno caso "base" | | | |
|---|---|---|---|---|
| | U=0,5 | U=0,3 | U=0,1 | Totale |
| | dev.st [W/K] | dev.st [W/K] | dev.st [W/K] | dev.st [W/K] |
| R7 | 7,0 | 6,7 | 5,5 | 9,9 |
| B3 | 5,6 | 5,2 | 3,1 | 7,4 |
| C3 | 4,9 | 2,8 | 0,9 | 8,9 |
| C7 | 3,0 | 1,8 | 0,6 | 3,2 |
| IF3 | 11,5 | 25,2 | 18,1 | 19,2 |
| GF7 | 3,1 | 1,6 | 0,7 | 6,9 |
| W9 | 67,8 | 69,2 | 71,1 | 71,0 |

Per quanto riguarda il caso "base" con isolamento interno, i ponti termici che pesano maggiormente sullo scambio termico per trasmissione attraverso i ponti termici sono:

- W9 (parete esterna – serramento) che incide mediamente il 47%;
- IF3 (parete esterna – solaio interpiano) che incide mediamente il 39%
- R7 (parete esterna – copertura) che incide mediamente il 14%.

Inoltre, al ponte termico W9 è associata un'elevata deviazione standard relativa alle dispersioni attraverso di esso e pertanto risulta essere il ponte termico la cui variazione maggiormente influenza il fabbisogno.

La variabile che interessa maggiormente il W9 è la conducibilità termica della muratura (tabella 2.12) e pertanto è anche il parametro che maggiormente influenza il fabbisogno.

I ponti termici pesano mediamente 35,4% sul fabbisogno (rispetto al 28,4% dell'isolamento a cappotto e 47% dell'isolamento ad intercapedine) variando da 12% a 25% per $U_m$ = 0,5 W/(m$^2$K), da 22% a 41% per $U_m$ = 0,3 W/(m$^2$K), da 46% a 63,5% per $U_m$ = 0,1 W/(m$^2$K).

Se si considera invece lo stesso caso di studio analizzato con metodo semplificato, si nota che mediamente il fabbisogno è più elevato (63,3 kWh/m$^2$ rispetto a 47,3 kWh/m$^2$) e non varia a parità di trasmittanza termica dell'involucro (tabella 2.27).

Al pari, l'incidenza dei ponti termici sul fabbisogno è notevolmente maggiore: 51,4% rispetto a 35,4%.

*Isolamento interno: correzione telaio e correzione telaio con struttura portante in calcestrauzzo*

La correzione dei serramenti comporta una leggera riduzione del fabbisogno da 47,3 kWh/m$^2$ a 43,2 kWh/m$^2$ (tabella 2.28). In questo caso il ponte termico che pesa maggiormente sulle dispersioni è l'IF3 (50%) seguito dal W9 (33%).

L'incidenza dei ponti termici sul fabbisogno, rispetto al caso "base", è lievemente diminuita passando da 35,4% a 30,1. Al pari dei casi precedenti, il calcolo con metodo semplificato comporta una sovrastima delle dispersioni attraverso i ponti termici, anche se in questo caso la differenza è minore (38% rispetto al 30% con metodo dettagliato) nonché una sovrastima del fabbisogno (49 kWh/m$^2$ rispetto a 43,2 kWh/m$^2$).

Il caso di studio con isolamento interno e pilastri non comporta notevoli divergenze rispetto al caso precedente.

# 3. Componenti di involucro speciali: le serre solari

Il lavoro descritto nel presente capitolo ha come obiettivo generale il confronto tra metodologie per il calcolo degli apporti solari entranti in ambiente climatizzato attraverso una serra solare. I metodi di calcolo analizzati sono rispettivamente il metodo semplificato della norma UNI EN ISO 13790, Appendice E e il metodo dettagliato implementato in *EnergyPlus*.

Al fine di confrontare i metodi, è stato analizzato un modello di serra solare addossata ad un locale climatizzato di cui sono state condotte alcune analisi parametriche al variare delle caratteristiche fisico-tecniche e morfologiche della serra stessa. Infine, allo scopo di analizzare lo scostamento tra i metodi in termini di fabbisogno di energia termica nel periodo invernale, è stato analizzato un edificio residenziale con una serra solare addossata il cui fabbisogno è stato calcolato attraverso i metodi previsti dalla UNI EN ISO 13790 (metodi orario semplificato e mensile quasi stazionario) e il metodo dinamico implementato in *EnergyPlus*.

## 3.1 Il fenomeno fisico e la definizione delle tipologie di serre solari

La serra solare è uno dei possibili sistemi per il riscaldamento passivo degli edifici che permette di ridurre il fabbisogno di energia termico per il riscaldamento dell'edificio attraverso lo sfruttamento di apporti solari gratuiti.

I sistemi tecnologici possono essere classificati in base al meccanismo di trasferimento di energia termica all'ambiente interno:

- sistemi a guadagno diretto, in cui l'elemento edilizio che funge da accumulo termico è all'interno dello spazio abitato ed è nello stesso tempo il sistema di distribuzione dell'energia termica (figura 3.1);
- sistemi a guadagno indiretto, in cui l'accumulo termico fa parte del tamponamento esterno dell'edificio. La radiazione solare è pertanto assorbita dall'elemento di involucro ed entra all'interno dell'ambiente abitato attraverso meccanismi di conduzione attraverso la parete o convezione in presenza di aperture;
- sistemi a guadagno isolato, in cui la superficie di accumulo termico è separata dagli spazi abitati e il trasferimento di energia termica da tale sistema agli spazi abitati avviene attraverso diversi meccanismi di scambio termico.

Per quanto riguarda i sistemi a guadagno diretto, la radiazione solare entrante attraverso le superfici vetrate incide sulle superfici dell'ambiente stesso le quali fungono da collettori solari. Tali superfici devono pertanto possedere caratteristiche di accumulo termico in modo tale da accumulare calore e ricederlo all'ambiente interno con un ritardo temporale (sfasamento) e una diminuzione dell'ampiezza delle oscillazioni (attenuazione). In questo modo si riduce la possibilità di creare condizioni di discomfort interno dovuto al surriscaldamento diurno e all'eccessivo abbassamento della temperatura in periodo notturno.

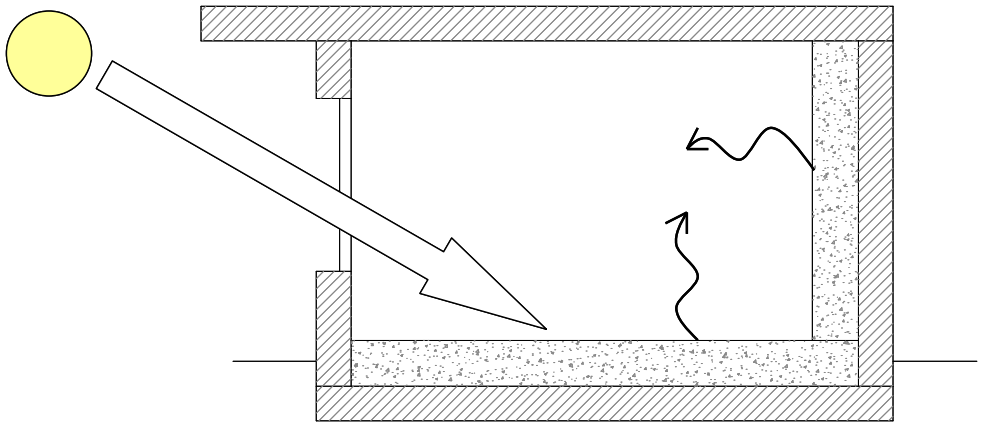


Figura 3.1. Sistema a guadagno diretto

Nei sistemi a guadagno indiretto la radiazione solare non penetra direttamente all'interno dell'ambiente abitato ma incide su un componente che ha funzione di accumulo termico.

I componenti con funzione di accumulo termico si possono distinguere in pareti solari in cui è la parete ad avere tale funzione e in *roof-pond* dove il componente con funzione di accumulo termico è posizionato in copertura.

Per quanto riguarda le pareti solari, si distinguono due tipologie:

- parete solare (figura 3.2) costituita da un'ampia superficie vetrata rivolta a Sud dietro la quale è posta una parete di accumulo termico posta ad una distanza di almeno una decina di centimetri. La radiazione solare incide sulla superficie vetrata, quindi, attraverso l'intercapedine d'aria, il calore viene scambiato soprattutto per convezione alla superficie della parete la quale scambia calore per conduzione all'ambiente interno. Il flusso termico entrante all'interno dell'ambiente è smorzato e sfasato rispetto al flusso termico che incide sulla superficie esterna della parete contribuendo a limitare le oscillazioni di temperatura.
- Muro Trombe (figura 3.3) che differisce dalla parete solare per la presenza di aperture di ventilazione tra l'intercapedine e l'ambiente interno posizionate sia nella parte alta che nella parte bassa della parete di accumulo.

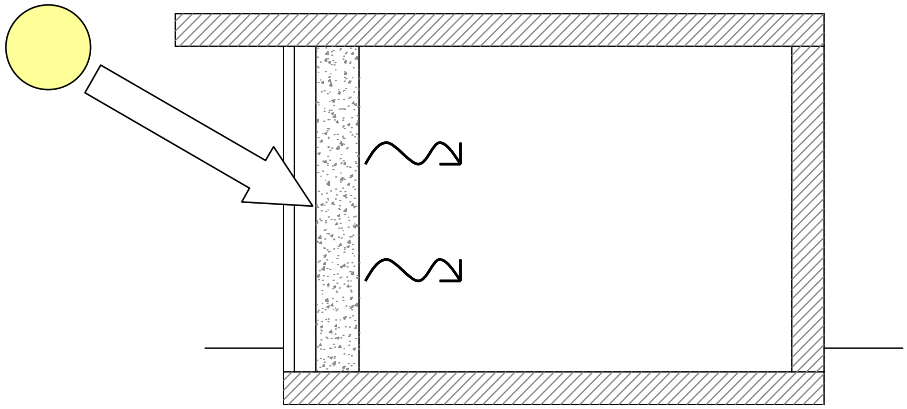


Figura 3.2. Sistema a guadagno indiretto: parete solare

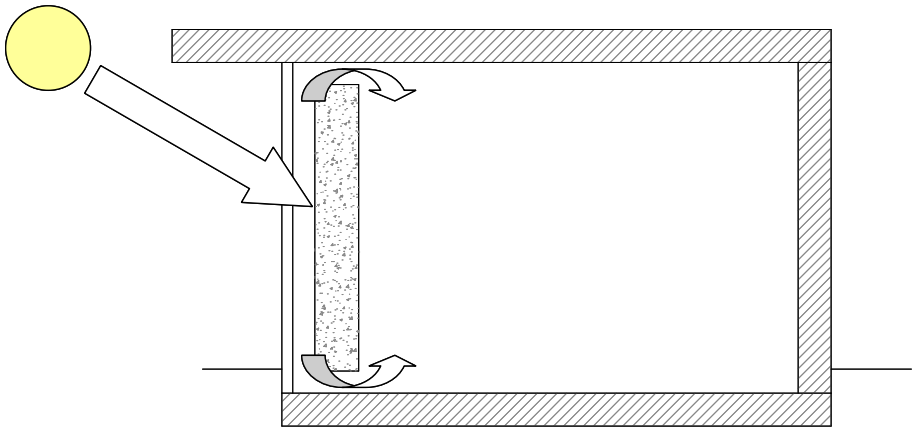


Figura 3.3. Sistema a guadagno indiretto: muro Trombe

La serra solare consiste in uno spazio separato da un'ampia superficie vetrata disposta a Sud che confina con lo spazio climatizzato attraverso una parete che può essere in parte vetrata in parte di accumulo. La serra solare (figure 3.4 e 3.5) può essere progettata sia come ambiente abitabile, in questo caso si può parlare di sistema solare diretto o come spazio tampone, in tal caso diventa un sistema solare indiretto. In quest'ultimo caso è bene prevedere un sistema di ventilazione tra la serra solare e lo spazio abitato in modo tale da pre-riscaldare l'aria di rinnovo. Nel caso di progettazione della serra come luogo abitabile, difficilmente si può pensare di raggiungere le condizioni di comfort termico in periodo invernale attraverso il solo impiego degli apporti solari gratuiti, in particolare in climi rigidi.

Tale sistema basa il proprio funzionamento sull'effetto serra:

- i raggi solari incidenti sulle pareri vetrate che delimitano la serra solare, entrano all'interno della serra essendo il vetro trasparente alle basse lunghezze d'onda;
- la radiazione solare viene quindi in parte riflessa e in parte assorbita dalle superfici opache che circondano l'ambiente interno della serra nonché assorbita, riflessa e trasmessa dalle superfici trasparenti;
- la quota di radiazione assorbita riscalda le superfici che a loro volta emettono radiazione infrarossa;
- questa radiazione, essendo ad alta lunghezza d'onda, non viene a sua volta ritrasmessa dagli stessi elementi vetrati verso l'ambiente esterno, comportando la "cattura" dell'energia termica all'interno della serra solare e quindi l'innalzamento della sua temperatura.

Se la serra è adiacente ad un ambiente da climatizzare, è possibile sfruttare diversi meccanismi di scambio termico (convezione, conduzione e irraggiamento) al fine di utilizzare il calore "catturato" per collaborare con l'impianto di riscaldamento e ridurne i consumi.

In generale tali sistemi tecnologici comportano l'utilizzo di ampie superfici vetrate per la captazione dell'energia solare e di strutture con elevata capacità termica per accumulare l'energia solare incidente in modo tale da evitare elevate fluttuazioni della temperatura interna e conseguenti

fenomeni di surriscaldamento quando la radiazione solare è elevata e sottoraffreddamento in assenza di radiazione solare.

La progettazione risulta alquanto complessa e può affidarsi ai soli fenomeni naturali di scambio termico (conduzione, convezione e irraggiamento) oppure all'introduzione di sistemi impiantistici (pompe o ventilatori) al fine di forzare i meccanismi di scambio termico convettivo tra la serra solare e l'ambiente da riscaldare.

Sebbene non risulti possibile affidarsi ai soli sistemi di riscaldamento solare per garantire in ambiente interno le condizioni di comfort, tali sistemi possono contribuire alla riduzione del fabbisogno di riscaldamento in periodo invernale.

La progettazione della serra solare è molto complessa e deve tenere in considerazione problematiche legate alla massimizzazione degli apporti solari in periodo invernale ma soprattutto al problema del surriscaldamento in periodo estivo.

Per ovviare a quest'ultimo problema, solitamente la serra solare viene considerata un ambiente chiuso in periodo invernale e completamente apribile in periodo estivo.

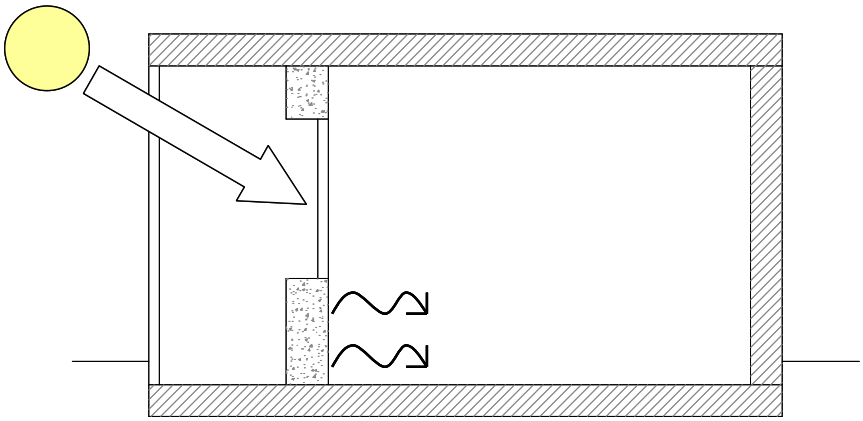


Figura 3.4. Serra solare senza sistema di ventilazione

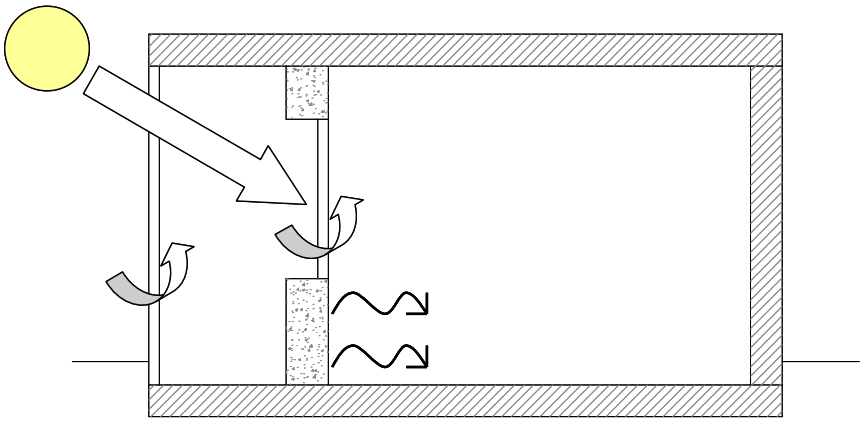


Figura 3.5. Serra solare con sistema di ventilazione

Uno studio volto ad analizzare la riduzione di fabbisogno termico per riscaldamento associata all'utilizzo di una serra solare addossata ad un edificio calcolato attraverso il codice di simulazione

dinamico *EnergyPlus* (Schibuola e Cecchinato, 2005) ha portato alla luce l'importanza di introdurre un sistema di ventilazione meccanica controllata tra la serra e l'ambiente interno. L'introduzione di tale sistema riduce infatti le dispersioni per ventilazione, tanto più quanto più il clima è freddo. Rispetto al caso di ventilazione naturale si hanno infatti riduzioni sul fabbisogno termico invernale pari a 9,3 kWh/m$^2$anno a Venezia, 3,7 kWh/m$^2$anno a Roma e 0,3 kWh/m$^2$anno a Catania. La sensibilità del fabbisogno energetico alla variazione della superficie della serra solare è invece limitata sia per ventilazione di tipo naturale che di tipo meccanico.

Inoltre, dallo stesso studio emerge che la serra solare è il sistema solare passivo che, se associato ad un tipo di ventilazione meccanica, permette di ottenere risultati migliori in termini di riduzione del fabbisogno di energia termica in periodo invernale rispetto ai restanti sistemi solari (diretti e indiretti).

Dall'analisi di una serra solare di 14,2 m$^2$ addossata ad un appartamento "tipo" di 72,5 m$^2$ emerge come la presenza della serra con ventilazione naturale tra serra e ambiente interno riduca il fabbisogno di energia termica in periodo invernale di una percentuale variabile tra il 25% (senza ventilazione) fino al 41% con ventilazione controllata. Il motivo è da ricercarsi nella riduzione delle dispersioni per ventilazione e infiltrazione, che si riducono ulteriormente in presenza di ventilazione meccanica controllata in quanto l'aria di rinnovo subisce un pre-riscaldamento all'interno della serra.

La prestazione della serra è fortemente influenzata dalla gestione della ventilazione (tra serra e ambiente interno e tra serra e ambiente esterno) e dei dispositivi di schermatura solare.

In particolare in periodo invernale, durante le ore del giorno, si dovranno attivare gli scambi termici tra serra e ambiente interno, sia solari diretti attraverso le superfici vetrate sia convettivi attraverso sistemi di ventilazione. Durante le ore notturne, al fine di minimizzare le dispersioni per trasmissione attraverso l'involucro della serra, possono essere predisposte chiusure oscuranti che incrementino la resistenza termica dell'involucro. Inoltre la ventilazione tra serra e ambiente interno, qualora presente, può essere interrotta quando la temperatura della serra è inferiore rispetto alla temperatura dell'ambiente interno.

In periodo estivo è doveroso schermare le superfici vetrate della serra in modo da minimizzare l'ingresso degli apporti solari diretti. A tal fine il progetto della serra deve prendere in considerazione:

- il corretto orientamento. L'esposizione a Sud è ottimale sia per il comportamento invernale che per il comportamento estivo;
- l'inserimento di aggetti orizzontali che ostacolino la radiazione solare diretta in periodo estivo quando il sole ha un'altezza solare maggiore;
- la predisposizione di un adeguati sistema di ventilazione tra la serra e l'ambiente esterno;
- la possibilità di rendere la serra completamente apribile;
- la predisposizione di adeguati sistemi di schermatura solare regolabili.

Durante le ore notturne del periodo estivo, al fine di aumentare le dispersioni per trasmissione e ventilazione della serra occorre attivare la ventilazione tra serra e esterno e rimuovere qualsiasi schermatura solare per facilitare lo scambio termico radiativo dell'involucro.

Per quanto concerne le tipologie di serre solari, se ne possono distinguere tre tipologie:

- serra addossata, caratterizzata dall'avere almeno tre fronti vetrati (figura 3.6a);
- serra incorporata, con un solo fronte vetrato e le restanti superfici confinanti con ambienti interni (figura 3.6b);
- serra semi-incorporata (a loggia), ibrida rispetto alle precedenti e poco utilizzata in territorio italiano.

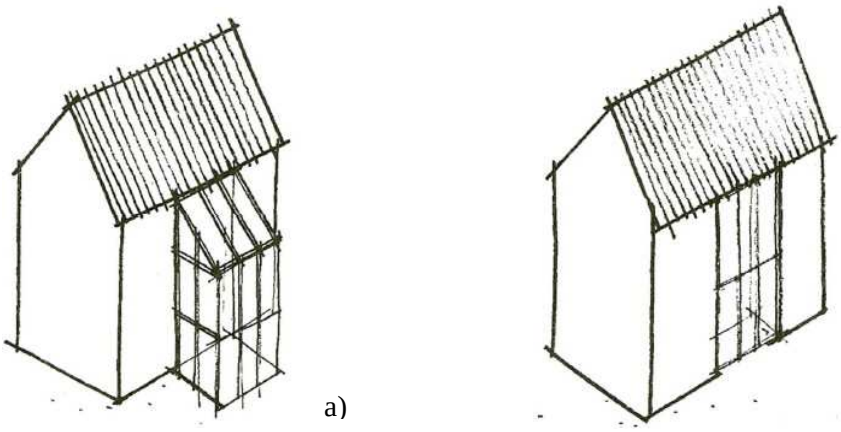



Figura 3.6. Modelli di serra solare addossata (a) e incorporata (b).
Fonte immagine: Giorgio F. Brambilla, Casa a Kentish Town, in "Costruire in Laterizio", n. 31.

### *3.2 Incentivi all'utilizzo di serre solari: la legislazione vigente*

La legislazione vigente in materia di risparmio energetico e di utilizzo di fonti di energia rinnovabili incentiva l'utilizzo di sistemi solari passivi.

Regione Piemonte

In Regione Piemonte l'incentivo all'utilizzo di serre solari viene specificato dalla Legge Regionale n. 13/2007 ed in particolare attraverso il regolamento attuativo di tale legge, ovvero attraverso la D.G.R. n. 45. Ulteriore menzione viene introdotta all'interno dell'Allegato Energetico – Ambientale al regolamento edilizio della città di Torino.

La D.G.R. n. 45/2009 definisce serra come il volume caratterizzato da un involucro prevalentemente trasparente, non riscaldato artificialmente, adiacente ad un volume riscaldato con il quale comunica mediante aperture. La serra può costituire un elemento filtro di ingresso, oppure essere collocata su una copertura o costituire la chiusura di logge, balconi o terrazzi.

La Legge Regionale 13 del 28 maggio 2007, *Disposizioni in materia di rendimento energetico nell'edilizia*, dispone le condizioni per cui *le serre solari e altri elementi costruttivi finalizzati alla captazione solare diretta dell'energia solare e all'esclusivo miglioramento dei livelli di isolamento termico* siano esclusi dal computo della cubatura.

In particolare, la sopracitata D.G.R. n. 45/2009 cita i seguenti criteri perché la serra solare possa essere esclusa dal computo delle volumetrie:

*a) la superficie totale esterna, escluse le pareti che confinano con l'ambiente interno riscaldato e il pavimento, deve essere delimitata da chiusure trasparenti per almeno il 60%;*

*b) la serra deve consentire un miglioramento delle prestazioni energetiche dell'edificio mediante il rispetto dei seguenti parametri:*

*– la riduzione delle dispersioni termiche dell'ambiente con il quale confina (serra tampone);*

*– la generazione di un apporto termico gratuito derivante da un'adeguata esposizione alla radiazione solare (serra captante);*

*c) la serra non deve compromettere il rispetto del rapporto aero-illuminante degli ambienti interni confinanti e non può essere adibita alla permanenza di persone;*

*d) la superficie vetrata apribile della serra deve essere pari o superiore alla superficie finestrata che si affaccia sulla stessa, maggiorata di un ottavo della superficie del pavimento della serra medesima;*

*e) il surriscaldamento deve essere controllato mediante sistemi di schermatura delle superfici vetrate e con l'apertura degli elementi vetrati;*

*f) la presenza della serra non deve modificare le condizioni di sicurezza per quanto concerne la ventilazione e l'aerazione delle cucine o locali in cui esistano impianti di cottura cibi o di riscaldamento a fiamma libera, con essa comunicanti. In tal caso devono essere previsti adeguati sistemi di aspirazione forzata con scarico diretto all'esterno;*

*g) all'interno della serra non devono essere installati impianti o sistemi di riscaldamento.*

Inoltre, si impone un vincolo sulla trasmittanza solare totale ($g_{gl,n}$) del vetro utilizzato quale involucro della serra che deve essere maggiore o uguale a 0,6; il volume della serra captante non deve eccedere il 10% del volume interno lordo dell'ambiente oggetto di intervento mentre, in caso di serre tampone, la profondità non deve eccedere i 2 m.

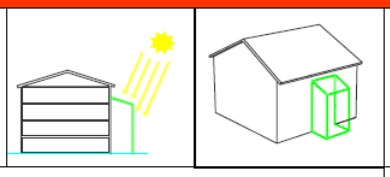
*La chiusura di vani scale e piani pilotis realizzati a seguito di titolo edilizio abilitativo richiesto prima dell'entrata in vigore del d.lgs 192/2005 rientra nei casi di esclusione dal calcolo delle volumetrie edilizie se effettuata con elementi prevalentemente vetrati e aventi una trasmittanza massima $U_w$ di 2,85 W/m$^2$K.*

*Le eventuali superfici o volumetrie che eccedono i limiti di cui ai punti precedenti vengono conteggiati applicando le regole urbanistiche vigenti.*

Le tipologie di serre individuate dalla D.G.R. n. 45/2009 sono la serra solare addossata e la serra solare incorporata. Per entrambe le tipologie vengono fornite schede tecniche con indicazioni progettuali di massima (figure 3.7 e 3.8).

**Serre**

**Tipologia di inserimento**



Serra addossata

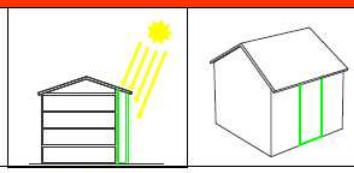
Legenda
- ●●● ottimale
- ●● buono
- ● sufficiente
- ○ scarso
- NA non ammissibile

| REQUISITI | VALUTAZIONI | |
|---|---|---|
| **Orientamento** | | |
| L'orientamento ottimale della serra addossata è sulla parete dell'edificio con esposizione sud ± 30°. Se orientata a nord, nord-est, nord-ovest, est, ovest non determina un significativo apporto termico, ma contribuisce alla riduzione delle dispersioni termiche dell'ambiente con il quale confina (spazio tampone). | Sud | Serra Captante ●●● |
| | Sud-Est, Sud-Ovest | Serra Captante ●● |
| | Nord, Nord-Est, Nord-Ovest,Est, ovest | Serra Captante NA |
| **Ombreggiamento** | | |
| -Nel periodo di riscaldamento deve essere verificato che la serra risulti irraggiata per almeno il 70% delle ore di soleggiamento teorico. -Nel periodo estivo il surriscaldamento deve essere controllato con sistemi di apertura e schermatura; particolare attenzione va posta nel caso di orientamento Sud-ovest, Ovest | Presenza di sistemi di apertura e schermatura esterna | ●●● |
| | Presenza di sistemi di apertura e schermatura interna | ● |
| | Assenza di sistemi di apertura e schermatura | NA |

Figura 3.7. Tipologia di scheda relativa alla serra addossata con indicazioni progettuali.
Fonte immagine: Deliberazione della Giunta Regionale 4 agosto 2009, n. 45

**Serre**

**Tipologia di inserimento**



Serra incorporata

Legenda
- ●●● ottimale
- ●● buono
- ● sufficiente
- ○ scarso
- NA non ammissibile

| REQUISITI | VALUTAZIONI | |
|---|---|---|
| **Orientamento** | | |
| L'orientamento ottimale della serra incorporata è sulla parete dell'edificio con esposizione sud ± 30°. Se orientata a nord, nord-est, nord-ovest, est, ovest non determina un significativo apporto termico, ma contribuisce alla riduzione delle dispersioni termiche dell'ambiente con il quale confina (spazio tampone). | Sud | Serra Captante ●●● |
| | Sud , Sud-Est, Sud-Ovest | Serra Captante ●● |
| | Nord, Nord-Est, Nord-Ovest,Est, ovest | Serra Captante NA |
| **Ombreggiamento** | | |
| -Nel periodo di riscaldamento deve essere verificato che la serra risulti irraggiata per almeno il 70% delle ore di soleggiamento teorico. -Nel periodo estivo il surriscaldamento deve essere controllato con sistemi di apertura e schermatura; particolare attenzione va posta nel caso di orientamento Sud-ovest, Ovest | Presenza di sistemi di apertura e schermatura esterna | ●●● |
| | Presenza di sistemi di apertura e schermature interna | ● |
| | Assenza di sistemi di apertura e schermatura | NA |

Figura 3.8. Tipologia di scheda relativa alla serra incorporata con indicazioni progettuali.
Fonte immagine: Deliberazione della Giunta Regionale 4 agosto 2009, n. 45

Città di Torino

Un secondo riferimento legislativo in cui sono presenti indicazioni progettuali di massima, è l'*Allegato Energetico-Ambientale al regolamento edilizio della città di Torino* che fornisce, tra i requisiti volontari incentivati per ottenere sconti sugli oneri di urbanizzazione, quello relativo agli *apporti solari passivi e attivi per il riscaldamento degli ambienti con sistemi specifici di captazione dell'energia solare*.

All'interno di questa voce si trovano indicazioni in caso si voglia installare un sistema di captazione solare quali muri Trombe, pareti solari ventilate, sistemi solari ad aria o ad acqua ecc.

Al fine di ottenere gli incentivi si deve dimostrare che con l'inserimento di sistemi solari passivi si ottengono riduzioni in termini di fabbisogno di energia termica per il riscaldamento di almeno il 10% ovvero che

$$\frac{(Q_{h0} - Q_{hs})}{Q_{h0}} \geq 10\% \tag{3.1}$$

dove

$Q_{h0}$ è il fabbisogno di energia per il riscaldamento dell'organismo edilizio di riferimento[5], calcolato in assenza del sistema di captazione solare, valutata in regime di funzionamento continuo e globalmente richiesta nel corso della stagione di riscaldamento per mantenere negli ambienti interni una temperatura di 20°C, per tutte le destinazioni d'uso tranne che per la categoria E(8)[6], per la quale dovrà essere assunta una temperatura minima di 16°C;

$Q_{hs}$ fabbisogno di energia per il riscaldamento dell'organismo edilizio di riferimento, tenendo conto della presenza del sistema di captazione solare, valutata in regime di funzionamento continuo e globalmente richiesta nel corso della stagione di riscaldamento per mantenere negli ambienti interni una temperatura di 20°C, per tutte le destinazioni d'uso tranne che per la categoria E(8), per la quale dovrà essere assunta una temperatura minima di 16°C.

La verifica del valore della differenza ($Q_{h0} - Q_{hs}$) deve essere svolta attraverso la norma UNI EN ISO 13790 e la specifica tecnica UNI/TS 11300-1.

## 3.3 Analisi dei modelli di calcolo semplificato

### *3.3.1 La normativa tecnica di settore – UNI EN ISO 13790*

L'appendice E della norma UNI EN ISO 13790 fornisce le procedure per calcolare lo scambio termico e gli apporti termici solari di elementi speciali, come serre solari (non climatizzate), elementi opachi con isolamento trasparente, pareti solari ventilate ed elementi d'involucro ventilati.

In particolare la procedura descritta all'interno dell'appendice E si applica a *serre solari non climatizzate adiacenti ad un ambiente climatizzato, come verande e serre addossate, separate dall'ambiente climatizzato mediante una parete divisoria*. Infatti, qualora la serra solare fosse riscaldata o presentasse un'apertura permanente tra questa e l'ambiente interno, la serra stessa dovrebbe essere considerata come parte dell'ambiente climatizzato.

*Nel caso di edifici esistenti vecchi, se il reperimento di tutti i dati di ingresso richiesti dovesse risultare troppo laborioso per lo scopo, in relazione alla convenienza economica del reperimento*

[5] Organismo edilizio di riferimento: edificio, indipendente o contiguo ad alter costruzioni, purché sia da tali costruzioni scorporabile agli effetti dell'isolamento termico, per il quale si vuole ottenere l'incentivazione mediante l'installazione di specifici dispositivi di captazione.

[6] In base al D.P.R. 412/93 la categoria E(8) è riferita ad edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali o assimilabili.

*stesso, si può definire a livello nazionale un metodo semplificato e/o valori standard, a seconda delle caratteristiche della serra solare non climatizzata […]. Specificazioni sulle condizioni per ammettere questo metodo semplificato o valori d'ingresso possono essere stabilite a livello nazionale, a seconda dello scopo del calcolo. In quel caso l'utente deve riportare il metodo o i valori d'ingresso che sono stati utilizzati e le fonti da cui sono stati tratti.*

La norma UNI EN ISO 13790 distingue e tiene separati gli effetti della serra rispettivamente sulle dispersioni termiche e sugli apporti gratuiti (primo e secondo termine delle equazioni 1.1 e 1.2).

La procedura prevede che il calcolo delle dispersioni per trasmissione e per ventilazione tra l'ambiente climatizzato e la serra avvenga attraverso la determinazione del fattore di riduzione $b_{tr}$ [-] calcolato in accordo con la UNI EN ISO 13789 ovvero secondo l'equazione seguente

$$b_{tr} = \frac{H_{ue}}{H_{iu} + H_{ue}} \tag{3.2}$$

così come per gli altri ambienti non climatizzati, dove $H_{ue}$ [W/K] e $H_{iu}$ [W/K] sono rispettivamente calcolati in funzione delle seguenti configurazioni di flusso termico per convezione.

In particolare, quanto si è in presenza di scambio termico per convezione come in figura 3.9 (configurazione 1), le equazioni sono le seguenti

$$H_{ue} = H_{tr,ue} + H_{ve,ue} = \sum U_{ue} \cdot A_{ue} + \sum \Psi_{ue} \cdot l_{ue} + \rho_a \cdot c_a \cdot q_{ve,ue} \tag{3.3}$$

$$H_{iu} = H_{tr,iu} + H_{ve,iu} = \sum U_{iu} \cdot A_{iu} + \sum \Psi_{iu} \cdot l_{iu} + \rho_a \cdot c_a \cdot q_{ve,iu} \tag{3.4}$$

dove $H_{tr,ue}$ è il coefficiente di scambio termico per trasmissione degli elementi di involucro tra ambiente non climatizzato (u) e ambiente esterno (e); $U_{ue}$ e $A_{ue}$ sono rispettivamente le trasmittanze termiche e le aree degli elementi di involucro che separano l'ambiente u dall'ambiente e; $\psi_{ue}$ e $l_{ue}$ sono rispettivamente le trasmittanze termiche lineari e le lunghezze dei ponti termici tra l'ambiente u e l'ambiente e; $q_{ve,ue}$ [m$^3$/s] è la portata di ventilazione tra ambiente u e ambiente e. I termini dell'equazione 3.4 sono analoghi e fanno riferimento agli scambi termici che avvengono tra l'ambiente interno (i) e l'ambiente non climatizzato (u).

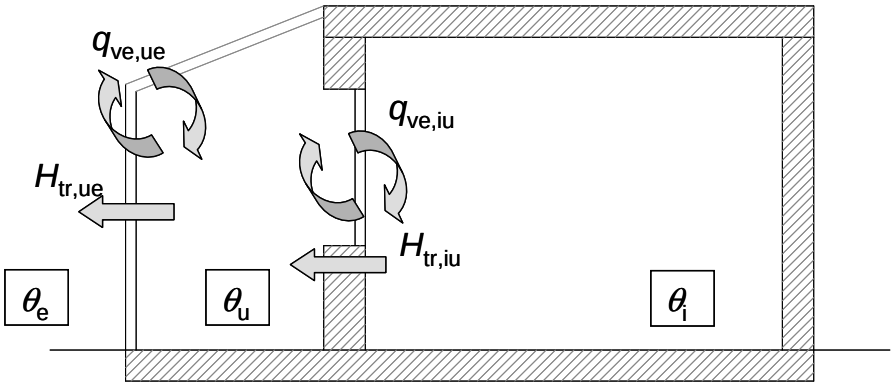



Figura 3.9. Modello di serra solare addossata e indicazione degli scambi termici per trasmissione e ventilazione tra l'ambiente interno e la serra solare e tra la serra solare e l'ambiente esterno. Configurazione 1.

Qualora la ventilazione avvenga come in figura 3.10 (configurazione 2), $H_{ue}$ e $H_{iu}$ sono calcolati come segue

$$H_{ue} = H_{tr,ue} = \sum U_{ue} \cdot A_{ue} + \sum \Psi_{ue} \cdot l_{ue} \tag{3.5}$$

$$H_{iu} = H_{tr,iu} + H_{ve,iu} = \sum U_{iu} \cdot A_{iu} + \sum \Psi_{iu} \cdot l_{iu} + \rho_a \cdot c_a \cdot q_{ve,ext} \tag{3.6}$$

dove $H_{ve,ue} = 0$ e $q_{ve,ext}$ [m$^3$/s] è la portata di ventilazione dall'ambiente interno, attraverso l'ambiente non climatizzato, verso l'ambiente esterno.

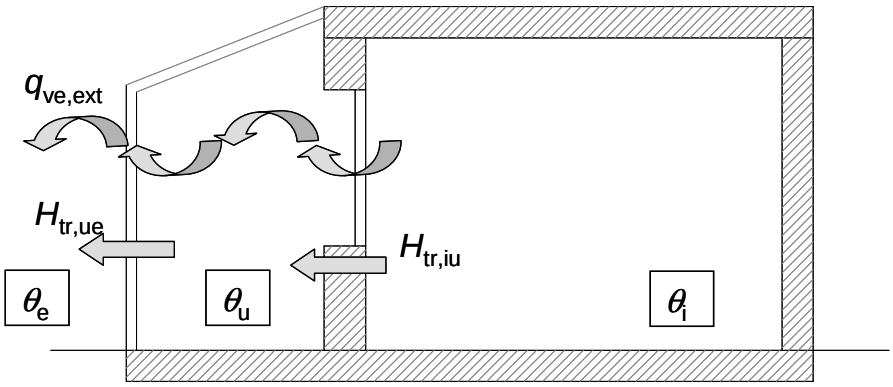



Figura 3.10. Modello di serra solare addossata e indicazione degli scambi termici per trasmissione e ventilazione tra l'ambiente interno e la serra solare e tra la serra solare e l'ambiente esterno. (configurazione 2)

Qualora la ventilazione avvenga come in figura 3.11 (configurazione 3), $H_{ue}$ e $H_{iu}$ sono calcolati come segue

$$H_{ue} = H_{tr,ue} + H_{ve,ue} = \sum U_{ue} \cdot A_{ue} + \sum \Psi_{ue} \cdot l_{ue} + \rho_a \cdot c_a \cdot q_{ve,sup} \tag{3.7}$$

$$H_{iu} = H_{tr,iu} = \sum U_{iu} \cdot A_{iu} + \sum \Psi_{iu} \cdot l_{iu} \tag{3.8}$$

dove $H_{ve,iu} = 0$ e $q_{ve,sup}$ [m$^3$/s] è la portata di ventilazione dall'ambiente esterno, attraverso l'ambiente non climatizzato, verso l'ambiente esterno.

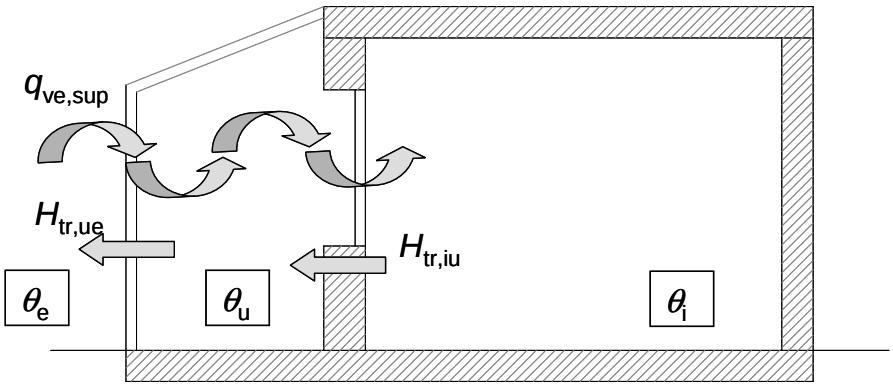



Figura 3.11. Modello di serra solare addossata e indicazione degli scambi termici per trasmissione e ventilazione tra l'ambiente interno e la serra solare e tra la serra solare e l'ambiente esterno. (configurazione 3)

Per quanto riguarda il calcolo degli apporti solari che penetrano nell'ambiente climatizzato attraverso la serra solare ($Q_{ss}$), la norma prevede che questi siano da considerarsi come la somma di due contributi ovvero

$$Q_{ss} = Q_{sd} + Q_{si} \tag{3.9}$$

dove $Q_{sd}$ sono gli apporti solari diretti attraverso la parete divisoria e $Q_{si}$ sono gli apporti solari indiretti.

L'energia solare diretta $Q_{sd}$ è la somma degli apporti solari entranti in ambiente climatizzato attraverso gli elementi di partizione trasparenti (w) e opachi (p)

$$Q_{sd} = F_{sh,e} \cdot (1 - F_{Fe}) \cdot g_e \cdot \left( \left(1 - F_{F,w}\right) \cdot g_w \cdot A_w + \alpha_p \cdot A_p \cdot \frac{H_{p,tot}}{H_{p,e}} \right) \cdot I_p \cdot t \tag{3.10}$$

Se si scompone l'equazione 3.10 in due parti, si può ricavare la sola componente solare attraverso l'involucro vetrato (equazione 3.11) e attraverso l'involucro opaco (equazione 3.12) secondo quanto indicato in figura 3.12.

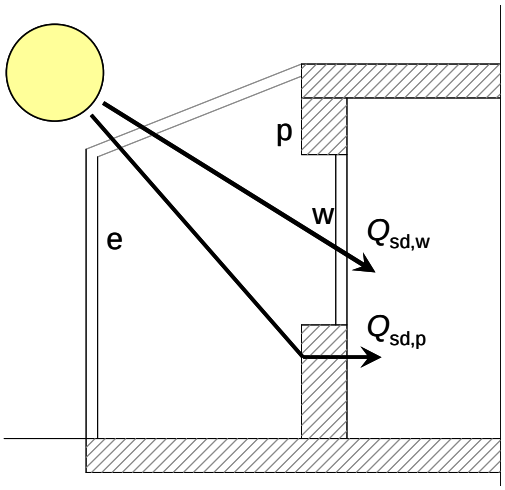



Figura 3.12. Schema di serra solare addossata con indicazione degli apporti solari diretti attraverso la parete di partizione opaca ($Q_{sd,p}$) e vetrata ($Q_{sd,w}$).

$$Q_{sd,w} = F_{sh,e} \cdot (1 - F_{Fe}) \cdot g_e \cdot \left( \left(1 - F_{F,w}\right) \cdot g_w \cdot A_w \right) \cdot I_p \cdot t \tag{3.11}$$

dove

$F_{sh,e}$ è il fattore di ombreggiatura [-]

$F_{Fe}$ è il fattore telaio dei serramenti della serra [-]

$g_e$ è la trasmittanza solare totale del vetro della serra [-]

$F_{F,w}$ è il fattore telaio della finestra posta tra l'ambiente interno e la serra solare [-]

$g_w$ è la trasmittanza solare totale del vetro della finestra posta tra l'ambiente interno e la serra solare [-]

$A_w$ è l'area della finestra posta tra l'ambiente interno e la serra solare [m$^2$]

$I_p$ è l'irradianza solare totale incidente sulla parete di partizione tra ambiente interno e serra solare [W/m$^2$]

$t$ è il periodo di calcolo [Ms]

$$Q_{\mathrm{sd,p}} = F_{\mathrm{sh,e}} \cdot (1 - F_{\mathrm{Fe}}) \cdot g_{\mathrm{e}} \cdot \left( \alpha_{\mathrm{p}} \cdot A_{\mathrm{p}} \cdot \frac{H_{\mathrm{p,tot}}}{H_{\mathrm{p,e}}} \right) \cdot I_{\mathrm{p}} \cdot t \tag{3.12}$$

dove

$\alpha_{\mathrm{p}}$ è il coefficiente di assorbimento solare della parete di separazione tra ambiente interno e serra solare [-]

$A_{\mathrm{p}}$ è l'area della parete di separazione tra ambiente interno e serra solare [m$^2$]

$H_{\mathrm{p,tot}}$ è il coefficiente di accoppiamento termico per trasmissione tra ambiente interno – ambiente esterno attraverso la serra solare [W/K] (figura 3.13) che, trascurando gli scambi termici bidimensionali, è pari a

$$H_{p,tot} = \frac{1}{\dfrac{1}{\sum A_{\mathrm{p}} \cdot U_{\mathrm{p}} + \sum A_{\mathrm{w}} \cdot U_{\mathrm{w}}} + \dfrac{1}{\sum A_{e} \cdot U_{e}}} \tag{3.13}$$

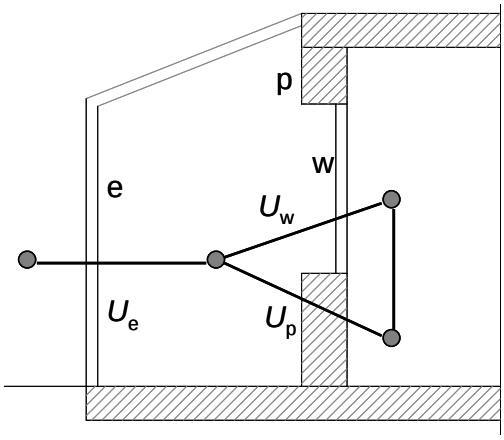



Figura 3.13. Schema di serra solare addossata con indicazione del coefficiente di accoppiamento termico $H_{\mathrm{p,tot}}$.

$H_{\mathrm{p,e}}$ è il coefficiente di accoppiamento termico tra la superficie della parete di separazione tra serra solare e ambiente interno verso la serra - ambiente esterno attraverso la serra solare [W/K] (figura 3.14)

$$H_{\mathrm{p,e}} = \frac{1}{\dfrac{1}{\sum \left(A_{\mathrm{p}} + A_{\mathrm{w}}\right) \cdot h_{\mathrm{p,w,e}}} + \dfrac{1}{\sum A_{\mathrm{e}} \cdot U_{\mathrm{e}}}} \tag{3.14}$$

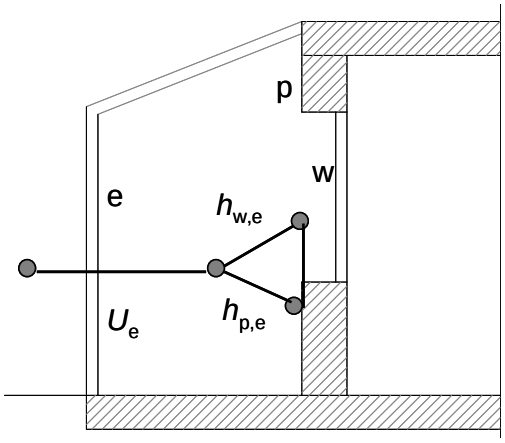



Figura 3.14. Schema di serra solare addossata con indicazione del coefficiente di accoppiamento termico $H_{p,e}$.

La quota indiretta degli apporti solari è

$$Q_{si} = (1 - b_{tr}) \cdot F_{sh,e} \cdot (1 - F_{F,e}) \cdot g_e \cdot \sum_j (I_j \cdot \alpha_j \cdot A_j) - F_{sh,e} \cdot (1 - F_{F,e}) \cdot g_e \cdot \alpha_p \cdot A_p \cdot \frac{H_{p,tot}}{H_{p,e}} \cdot I_p \cdot t \tag{3.15}$$

dove

$b_{tr}$ è il fattore di correzione calcolato secondo [-] l'equazione 3.2;

$I_j$ è l'irradianza solare totale incidente su ogni superficie opaca interna della serra (compresa la parete di partizione opaca tra ambiente interno e serra solare) [W/m$^2$];

$A_j$ è l'area di ogni superficie opaca interna della serra (compresa la parete di partizione opaca tra ambiente interno e serra solare) [m$^2$];

$\alpha_j$ è il coefficiente di assorbimento solare di ogni superficie opaca interna della serra (compresa la parete di partizione opaca tra ambiente interno e serra solare) [-].

In figura 3.15 è riportato uno schema degli apporti solari indiretti.

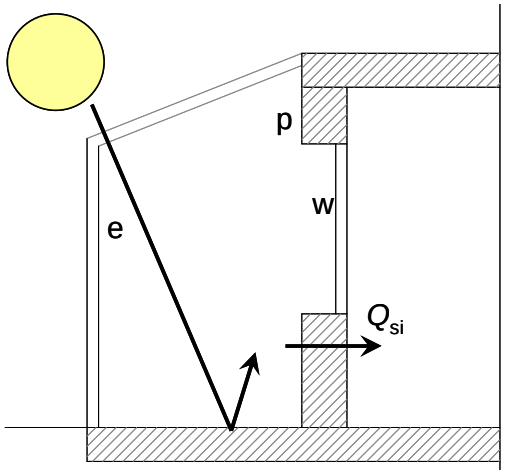



Figura 3.15. Schema di serra solare addossata con indicazione degli apporti solari indiretti ($Q_{si}$).

Gli apporti solari diretti sono pertanto dovuti alla radiazione solare totale che incide direttamente sulla parete di partizione tra serra solare e ambiente interno. Gli apporti solari indiretti invece

tengono conto della quota di apporti solari che entrano all'interno della serra solare, vengono assorbiti dalle altre superfici interne della serra stessa e vengono riemessi in ambiente contribuendo all'aumento di temperatura della serra ($\theta_u$) e in quota parte sono trasmessi all'ambiente interno per differenza di temperatura. Entra pertanto in ambiente interno la quota trasmessa attraverso la parete di partizione opaca (p) dovuta all'incremento della temperatura della serra ($\theta_u$). In prima approssimazione si può affermare che il contributo $Q_{si}$ sia proprio la quota entrante in ambiente per effetto serra.

Il modello di calcolo, rispetto al fenomeno fisico che descrive, è caratterizzato dalle seguenti semplificazioni:

- le proprietà solari del vetro della serra vengono prese in considerazione attraverso il parametro $g_e$ pari alla trasmittanza solare totale per incidenza di radiazione normale ($g_{e,n}$) moltiplicato per un fattore di esposizione ($F_w$) assunto pari a 0,9 secondo quando indicato dalla UNI EN ISO 13790 in assenza di informazioni più precise;
- la stessa ipotesi semplificativa viene fatta per la trasmittanza solare totale del vetro dell'elemento di partizione ($g_w$);
- si considera in maniera approssimata la variazione delle proprietà solari del vetro (della serra e della partizione vetrata) al variare dell'inclinazione della radiazione solare incidente;
- si trascura il fenomeno delle inter-riflessioni tra le pareti che circondano gli ambienti interni. In altre parole tutta l'energia solare che entra in ambiente viene considerata carico termico;
- si trascura l'inerzia termica delle strutture.

Un'altra semplificazione è inerente i fattori di ombreggiatura: si suppone infatti in prima approssimazione che tutte le superfici assorbenti ($A_j$) siano ombreggiate nella stessa misura dagli ostacoli esterni e dall'involucro più esterno della serra solare. In alternativa occorre associare ad ogni superficie assorbente *j*-esima il rispettivo fattore di ombreggiatura $F_{sh,e,j}$.

La procedura di calcolo descritta si applica in generale alle serre solari addossate ad un edificio. Se si intende calcolare gli apporti solari attraverso serre incorporate (figura 3.16) occorre introdurre altre ipotesi, ovvero:

- in caso le pareti di partizione tra serra e ambiente climatizzato siano più di una (di tipologia diverse o con orientamenti diversi), occorre calcolare per ogni parete i rispettivi apporti solari $Q_{sd}$ attraverso l'equazione 3.12;
- essendo il procedimento previsto in caso di involucro della serra completamente vetrato (comprese pareti laterali verticali e copertura), occorre considerare tali pareti opache all'interno del calcolo del fattore telaio dei vetri della serra secondo l'equazione seguente

$$F_{F,e} = \frac{A_{e,opaco}}{A_{e,tot}} \tag{3.16}$$

dove

$A_{e,opaco}$ [m$^2$] è l'involucro opaco della serra;

$A_{e,tot}$ [m$^2$] è l'involucro totale della serra.

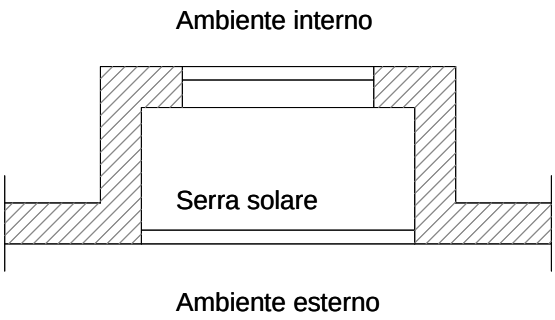



Figura 3.16. Pianta di una serra solare incorporata.

In figura 3.17 si fornisce lo schema generale degli apporti solari totali ($Q_{ss}$) entranti in ambiente climatizzato attraverso la serra solare addossata.

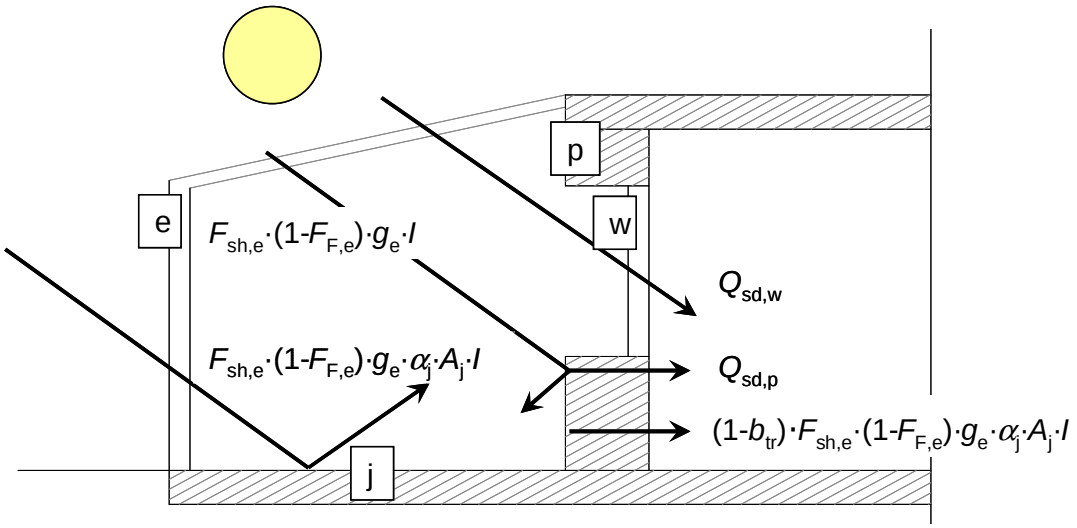



Figura 3.17. Schema di serra solare addossata con indicazione degli apporti solari totali ($Q_{ss}$).

In alternativa alla procedura sopra descritta, la UNI EN ISO 13790 introduce un metodo semplificato basato un'approssimazione conservativa che prevede nella stagione di riscaldamento di:

- calcolare lo scambio termico per trasmissione utilizzando il fattore di correzione, $b_{tr}$, come per un ambiente adiacente non climatizzato;
- ignorare gli apporti indiretti ($Q_{si}$) attraverso la serra solare nella zona di calcolo;
- calcolare solo la quota di apporti solari diretti considerando, per quanto concerne gli apporti solari entranti attraverso l'involucro vetrato, la trasmittanza solare totale sia della partizione vetrata ($g_w$) che del vetro della serra ($g_e$).

Nella stagione di raffrescamento:

- calcolare lo scambio termico per trasmissione utilizzando il fattore di correzione, $b_{tr}$, come per un ambiente adiacente non climatizzato;
- ignorare la serra solare per il calcolo degli apporti termici solari nella zona di calcolo;

- non tenere in considerazione alcuna riduzione della trasmittanza energetica solare da parte dell'involucro della serra solare, ad eccezione dei dispositivi di schermatura solare che sono utilizzati in maniera permanente durante l'intera stagione di raffrescamento.

La norma permette di decidere a livello nazionale, a seconda dell'applicazione e del tipo di edificio, di utilizzare la seguente procedura semplificata, come alternativa alla procedura descritta. Questa procedura si basa sull'appendice A della UNI EN ISO 13789.

Nel calcolo del bilancio di energia della zona di calcolo adiacente alla serra solare:

- ignorare gli apporti solari (e interni) nella serra solare e attraverso questa;
- specificare un valore corretto per il fattore di correzione $b_{tr}$, da applicare nella modalità di riscaldamento, che comprenda l'effetto positivo degli apporti solari (e interni) durante la stagione di riscaldamento secondo l'equazione seguente (UNI EN ISO 13789)

$$b_{tr} = \frac{\theta_i - \theta_u}{\theta_i - \theta_e} \tag{3.17}$$

con

$$\theta_u = \frac{\Phi + \theta_i \cdot H_{iu} + \theta_e \cdot H_{ue}}{H_{iu} + H_{ue}} \tag{3.18}$$

dove

$\theta_i$ è la temperatura dell'ambiente interno [-]

$\theta_e$ è la temperatura dell'ambiente esterno [-]

$\theta_u$ è la temperatura della serra solare [-]

$\Phi$ è il flusso termico solare entrante attraverso la serra [W]

- specificare un valore corretto appropriato per il fattore di correzione $b_{tr}$, da applicare nella modalità di raffrescamento, che comprenda l'effetto negativo degli apporti solari (e interni) durante la stagione di raffrescamento.

### 3.3.2 Gli studi di ricerca a livello nazionale e internazionale

*Modellazione semplificata della serra*

Molti studi di ricerca si sono posti l'obiettivo si individuare un modello di calcolo semplificato per il calcolo degli apporti solari attraverso le serre.

Un metodo semplificato per il calcolo degli apporti solari è il "Metodo 5000" (Colombo et al, 1994) che prevede di calcolare gli apporti solari entranti nell'ambiente interno attraverso la serra solare scomponendoli tra componente diretta attraverso la parte vetrata e attraverso la parete opaca e componente indiretta (ovvero la componente solare che per effetto serra provoca un innalzamento della temperatura). In particolare gli apporti indiretti sono calcolati come

$$F_s = a_1 \cdot E_s - a_2 \cdot \Phi_{sdg} - \Phi_{smw} \quad \text{[kWh/giorno]} \tag{3.19}$$

dove $E_s$ è l'energia solare entrante in ambiente interno attraverso la serra solare; $\Phi_{sdg}$ sono gli apporti solari entranti all'interno dell'ambiente climatizzato attraverso la parete vetrata che lo separa dalla serra solare; $\Phi_{smw}$ sono gli apporti solari attraverso la superficie opaca; $a_1$ e $a_2$ sono coefficienti che permettono di ridurre gli apporti solari entranti rispettivamente per effetto delle inter-riflessioni multiple tra la superfici interne della serra.

La procedura di calcolo è del tutto analoga alla procedura della UNI EN ISO 13790 descritta all'interno del sottoparagrafo 3.3.1, a meno dei coefficienti $a_1$ e $a_2$ che permettono di considerare in maniera semplificata il fenomeno complesso delle inter-riflessioni tra superfici degli ambienti interni.

Cardinale e Ruggero (Cardinale e Ruggero, 2000) confrontano il Metodo 5000 sopra descritto con il metodo proposto dalla norma UNI 10345, non più in vigore, che calcola gli apporti solari entranti all'interno dell'ambiente climatizzato attraverso la serra solare come somma degli apporti solari diretti attraverso la partizione trasparente ($Q_{sd}$) e gli apporti solari trattenuti all'interno della serra solare e trasmessi quindi attraverso la partizione opaca ($Q_{si}$). Gli apporti totali ($Q_{ss}$) sono dati da

$$Q_{ss} = Q_{sd} \cdot \xi + (1-\xi) \cdot Q_{si} \tag{3.20}$$

dove $\xi$ è l'equivalente di $b_{tr}$ nell'equazione 3.17.

Gli autori confrontano i metodi analizzati e li confrontano con un metodo corrispondente alla combinazione dei due (gli apporti solari sono calcolati attraverso il Metodo 5000 e le dispersioni attraverso il metodo della norma UNI 10345). Dai risultati emerge che la combinazione tra i metodi permette di ottenere risultati intermedi tra i due, portando il Metodo 5000 ad una sovrastima (non essendo considerate le dispersioni attraverso l'involucro della serra) e il metodo secondo la UNI 10345 ad una sottostima degli apporti.

Un altro metodo semplificato per il calcolo degli apporti solari è il "*Solar load ratio*" (Balcomb et al,1983) ripreso anche da Oliveira et al. (Oliveira e De Oliveira Fernandes, 1992) che prevede l'individuazione della frazione solare pari al rapporto tra gli apporti solari ($Q_{sol}$) e l'energia che l'edificio richiederebbe in assenza di apporti solari ($Q_{ref}$)

$$f = \frac{Q_{sol}}{Q_{ref}} \tag{3.21}$$

e quindi il calcolo di un fattore di utilizzazione ($\eta$) al fine di individuare la quota utile degli apporti solari

$$f = \eta \cdot \frac{Q_{sol}}{Q_{ref}} \tag{3.22}$$

Attraverso simulazioni numeriche vengono pertanto individuate equazioni di correlazione che legano il fattore di utilizzazione all'inerzia termica dell'edificio. Attraverso lo stesso metodo Torra et al. (Torra et al, 1988) valutano aspetti progettuali di serre solari localizzate a Barcellona.

Un ulteriore metodo semplificato è stato invece introdotto da Hassid (Hassid, 1986) che permette di ricavare il flusso termico tra la serra e l'ambiente adiacente attraverso equazioni di bilancio risolte per il periodo diurno e notturno, in cui l'inerzia termica dell'edificio non viene tenuta in

considerazione attraverso equazioni di correlazione (come per il metodo "*Solar load ratio*") ma attraverso un modello resistivo – capacitivo.

*Fattore di esposizione dei vetri*

Diversi studi sono stati finalizzati a ricavare un valore dettagliato del fattore di esposizione ($F_w$), che invece la UNI EN ISO 13790 fissa a 0,9 in assenza di informazioni più precise.

Corrado e Serra (Corrado e Serra, 1997) hanno individuato diversi valori di fattore di esposizione in funzione dell'orientamento, della località e del sistema di serramento analizzato in condizioni estive di progetto.

In particolare i fattori di esposizione sono stati ricavati secondo due metodologie, attraverso il rapporto tra il valore medio dell'energia solare trasmessa a bassa lunghezza d'onda e la stessa per incidenza normale ($\tau_{S,m}/\tau_{S,n}$) e l'analogo considerando la trasmittanza solare totale media e per incidenza normale ($g_{gl,m}/g_{gl,n}$) essendo

$$\tau_{S,m} = \frac{\sum_{i=1}^{45} E_b(\theta_i)\cdot\tau_{S,\theta}(\theta_i) + (E_d + E_a)\cdot\tau_{S,d}}{E_b + E_d + E_a} \quad \text{con } \theta_1=1°,\ \theta_2=3°,\ \ldots,\ \theta_{45}=89° \tag{3.23}$$

dove $E_b$ è la radiazione solare diretta, $E_d$ la radiazione solare diffusa, $E_a$ la quota riflessa e $\theta$ *i*-esimo l'angolo di incidenza della radiazione solare rispetto alla finestra.

$$g_{gl,m} = \frac{\sum_{i=1}^{45} E_b(\theta_i)\cdot g_{gl,\theta}(\theta_i) + (E_d + E_a)\cdot g_{gl,d}}{E_b + E_d + E_a} \tag{3.24}$$

dove $g_{gl,q}$ è la trasmittanza solare totale considerando la radiazione solare diretta (e quindi funzione dell'angolo di incidenza), $g_{gl,d}$ è la trasmittanza solare totale considerando la radiazione solare diffusa.

Oliveti et al. (Oliveti et al., 2009) ricavano il coefficiente di esposizione $F_w$ medio mensile per sistemi vetrati con doppio vetro chiaro per i 101 capoluoghi di provincia del territorio nazionale elaborando i dati orari ottenuti con il modello implementato nel Type 56 del codice TRNSYS che utilizza i dati di uscita del software WINDOW 4.1.

Per ogni ora sono stati ricavati pertanto le energie entranti orarie secondo l'angolo orario medio di incidenza per il sistema vetrato preso in considerazione considerando una differenza di temperatura $\Delta\theta$ tra interno ed esterno pari a zero ed effettuando quindi una media giornaliera e mensile dei dati orari ottenuti. Lo stesso procedimento è stato effettuato considerando in tutte le ore l'energia incidente secondo la direzione normale. Il rapporto tra i valori medi di energia entrante per incidenza reale e per incidenza normale costituiscono il coefficiente di esposizione $F_w$.

Da un confronto tra i fattori di esposizione così calcolati e il valore fisso pari a 0,9 indicato dalla UNI/TS 11300-1 risulta evidente che l'utilizzo del valore fisso si scosta molto dal valore corretto, soprattutto per esposizione a Sud; inoltre in periodo estivo la semplificazione comporta una sovrastima degli apporti solari pari ad un massimo di 21,6% per esposizione Sud mentre in inverno

comporta una sottostima fino al 9,1%. Gli autori sottolineano inoltre come, oltre ad influenzare gli apporti solari attraverso l'involucro trasparente, il calcolo semplificato conduca anche errori sul fattore di utilizzazione sia in periodo invernale che in periodo estivo.

*Coefficiente correttivo per il calcolo degli apporti solari*

Oliveti et al. (Oliveti et al, 2008; Oliveti at al, 2010) hanno individuato un modello per il calcolo degli apporti solari entranti in ambienti interni (in assenza di serre solari). Questo metodo intende fornire un calcolo più sofisticato rispetto al calcolo presente all'interno della UNI EN ISO 13790 e a livello nazionale della UNI/TS 11300-1 che considera assorbita tutta l'energia solare entrante attraverso le superfici vetrate.

Il modello individuato considera invece che non tutta l'energia solare entrante in ambiente venga assorbita e valuta tale quota assorbita come somma dei seguenti contributi:

- contributo solare ovvero frazione solare trasmessa dalla superficie vetrata
- contributo convettivo – radiativo, ovvero quota assorbita dal vetro e successivamente ceduta all'ambiente interno. Questo contributo risulta scomposto in:
    - quota di radiazione solare che la finestra riceve dall'esterno
    - quota di radiazione solare riflessa dalle superfici interne all'ambiente e assorbita dalla superficie vetrata.

Questi fenomeni sono aggregati all'interno del coefficiente di assorbimento effettivo della radiazione solare entrante $\alpha_{cav}$ che risulta pari al rapporto tra l'energia solare assorbita dall'ambiente ($Q_{sol,in}$ - $Q_{sol,out}$) e l'energia solare entrante ($Q_{sol,in}$)

$$\alpha_{cav} = \frac{Q_{sol,in} - Q_{sol,out}}{Q_{sol,in}} \tag{3.25}$$

e che viene ricavato attraverso correlazioni matematiche in funzione dei seguenti parametri che caratterizzano un ambiente (Oliveti et al, 2011):

- coefficiente di assorbimento solare medio delle superfici opache interne ($\alpha_m$)
- rapporto tra area vetrata e area opaca dell'ambiente ($\psi$)
- coefficiente di trasmissione della radiazione diffusa ($\tau_d$)

Il coefficiente di assorbimento effettivo viene pertanto introdotto quale fattore di correzione al fine di ricavare gli apporti solari ($Q_{sol}$) entranti attraverso le superfici vetrate.

Tale coefficiente viene infine utilizzato per analizzare il comportamento di un ambiente con e senza una serra addossata (Oliveti et al, 2011) al fine di analizzare la riduzione del fabbisogno di energia termica in periodo di riscaldamento.

Un altro lavoro svolto da Oliveti et al. (Oliveti et al, 2003) ha l'obiettivo di fornire un semplice algoritmo per il calcolo dell'energia entrante all'interno di un sistema vetrato (vetri basso emissivi e a controllo solare) che tenga conto anche della dipendenza angolare delle proprietà ottiche dei vetri, noti i dati solitamente reperibili dai produttori.

L'energia solare entrante è la somma degli apporti solari (diretti, diffusi e riflessi) moltiplicati per un coefficiente che tiene conto che parte dell'energia solare entrante viene riflessa di nuovo verso l'esterno ($\alpha$) e lo scambio termico dovuto al gradiente di temperatura tra interno ed esterno. Il lavoro una semplice equazione di incognite $g_{gl,n}$ e $U_g$ (dati di facile reperimento) fornendo per diverse località, orientamenti e periodi dell'anno i valori per i quali la trasmittanza solare totale per incidenza normale ($g_{gl,n}$) è da correggere.

## 3.4 Analisi dei modelli di calcolo dettagliato

### *3.4.1 Gli studi di ricerca a livello nazionale e internazionale*

Lo studio di modelli dettagliati si è rivolto al calcolo della distribuzione degli apporti solari entranti in ambiente interno attraverso le superfici vetrate. L'ottimizzazione di tali modelli di calcolo permette infatti una stima più accurata del fabbisogno di energia termica (per riscaldamento e raffrescamento), del carico termico in periodo estivo e della temperatura interna al fine di garantire condizioni di comfort termico nonché del livello di illuminazione naturale al fine di garantire condizioni di comfort visivo.

Il calcolo della distribuzione della radiazione solare entrante all'interno degli ambienti attraverso le superfici vetrate può essere effettuato attraverso diverse metodologie di calcolo ognuna delle quali caratterizzata da un diverso livello di complessità e pertanto di accuratezza.

Wall (Wall, 1997) confronta quattro modelli di calcolo implementati all'interno di quattro codici di calcolo (rispettivamente DEROB – LTH, SUNREP in TRNSYS, FRES e tsbi3) partendo dal presupposto che una valutazione accurata diventa tanto più necessaria quanto più lo spazio interno da valutare presenta ampie superfici vetrate. Infatti, se per edifici con aperture vetrate di medie dimensioni la percentuale di radiazione solare che resta trattenuta all'interno dell'ambiente (successivamente ai fenomeni di riflessione interna) è di circa il 95÷100%, per spazi vetrati questa percentuale varia dal 30 al l'85% (Wall, 1995).

Il modello più semplificato è quello implementato all'interno di TRNSYS che prevede una distribuzione della radiazione solare unicamente funzione delle superfici interne, mentre il modello più complesso prevede il calcolo accurato della radiazione solare diretta attraverso il calcolo della posizione dei raggi solari che entrano all'interno dell'ambiente attraverso le superfici vetrate. Dallo studio emerge una differenza tra i metodi di calcolo: in particolare più il calcolo è semplificato più gli apporti solari sono sovrastimati e questa differenza è dovuta principalmente al fatto che il metodo semplificato non tiene in considerazione che parte della quota trasmessa all'interno dell'ambiente viene riflessa dalle superfici interne e ritrasmessa in ambiente esterno dalle finestre. Per questo motivo, maggiore è la superficie vetrata, maggiore è lo scostamento tra i metodi.

Athienitis e Stylianou (Athienitis e Stylianou, 1991) e Cucumo et al. (Cucumo et al, 1995) individuano una metodologia per calcolare il coefficiente di assorbimento solare di un locale attraverso il metodo RIM (Radiosity - Irradiation Method) il cui algoritmo di calcolo, sviluppato da

Sparrow e Cess (Sparrow e Cess, 1978), utilizza i fattori di vista per calcolare la distribuzione di radiazione solare all'interno di un ambiente.

Trombe et al. (Trombe et al, 1999) sviluppano un modello di calcolo allo scopo di calcolare la distribuzione della radiazione solare diretta e diffusa in regime dinamico per ambienti con elevate superfici vetrate, di forma complessa e in presenza di ostacoli ombreggianti (elementi d'arredo, ecc.). Lo scopo del lavoro è di valutare in maniera dettagliata la distribuzione delle temperature superficiali e il flusso solare che incide su un occupante in condizioni estive per la valutazione delle condizioni di comfort termico. Tale modello viene quindi validato attraverso il confronto dei suoi risultati con quelli di un monitoraggio.

Un ulteriore modello di calcolo è stato implementato da Voeltzel et al. (Voeltzel et al, 2001) ed è finalizzato in particolare alla modellazione dettagliata dei flussi d'aria che si instaurano all'interno di un ampio spazio vetrato in presenza di forti gradienti di temperatura.

Mottard e Fissore (Mottard e Fissore, 2007) dimostrano che il calcolo della distribuzione della radiazione solare in funzione dei fattori di vista non è sufficientemente dettagliato per la valutazione di spazi fortemente vetrati dove una gran parte di radiazione solare viene ritrasmessa verso l'ambiente esterno attraverso i componenti vetrati. Tale modello di calcolo viene validato attraverso il monitoraggio di un modello di serra solare: la differenza media in termini di temperatura interna della serra solare è di 2,4 °C mentre la differenza in termini di energia solare fornita dalla serra all'ambiente adiacente è dell'11%.

Un ulteriore metodo di calcolo viene sviluppato da Chatziangelidis e Bouris (Chatziangelidis e Bouris, 2009). Tale metodo permette di calcolare la distribuzione di radiazione solare attraverso il metodo dei fattori di vista.

### *3.4.2 Modello di calcolo del software EnergyPlus*

Nel software *EnergyPlus*, la distribuzione degli apporti solari entranti all'interno di un locale può essere valutata secondo diverse modalità di calcolo che corrispondono a diversi livelli di dettaglio.

Nel presente studio, al fine di calcolare gli apporti solari entranti in ambiente interno attraverso la serra solare, è stata utilizzata la modalità di calcolo "*Full interior and exterior with reflections*".

Questo modello di calcolo considera che la radiazione solare diretta trasmessa attraverso le finestre della zona ($I_b$) incida sulle superfici interne (verticali, orizzontali, sia opache che vetrate) qualora non ostacolata da aggetti o ostacoli esterni che creano ombreggiamento.

Parte della radiazione solare viene pertanto trasmessa, parte viene riflessa e parte assorbita e trasmessa all'esterno e all'interno secondo lo schema in figura 3.18.

È possibile inserire le proprietà ottiche del vetro sia come variabili in funzione della lunghezza d'onda sia valori medi per le lunghezze d'onda del solare, del visibile e dell'infrarosso.

Per confrontare i diversi metodi di calcolo sono state inserite le proprietà solari medie per incidenza di radiazione normale rispetto alla superficie.

*EnergyPlus* considera la variabilità delle caratteristiche solari del vetro in funzione dell'angolo di incidenza della radiazione solare.

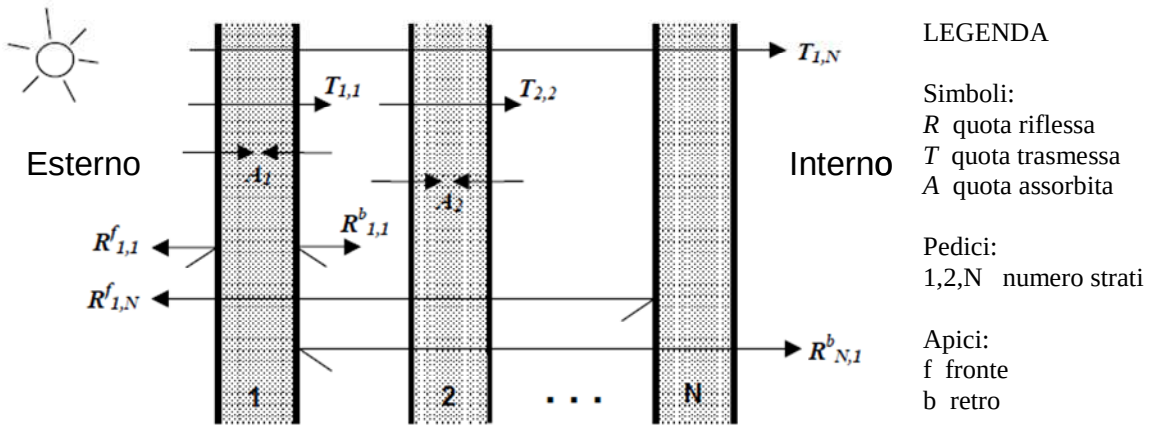



Figura 3.18. Schema della quota solare riflessa, assorbita e trasmessa attraverso un sistema vetrato costituito da *N* strati. Fonte immagine: *EnergyPlus* User Guide.

La radiazione solare diretta che incide su una superficie opaca viene in parte assorbita, in funzione del coefficiente di assorbimento solare $\alpha$, e in parte riflessa in ambiente. La quota riflessa viene considerata radiazione diffusa ($I_d$) e si ripartisce uniformemente tra tutte le superfici interne della zona. Al pari della quota riflessa dalle superfici interne, vi è inoltre la quota di radiazione solare riflessa dal terreno, anch'essa diffusa, nonché la quota solare diffusa dalla volta celeste.

Inoltre, della radiazione solare diretta incidente su una finestra interna, viene calcolata la quota assorbita dal sistema vetrato e riemessa in parte in un ambiente in parte nell'ambiente adiacente, la quota riflessa e quella trasmessa.

Tutta la radiazione solare che viene trasmessa attraverso una finestra interna viene trattata come radiazione solare diffusa (figura 3.19).

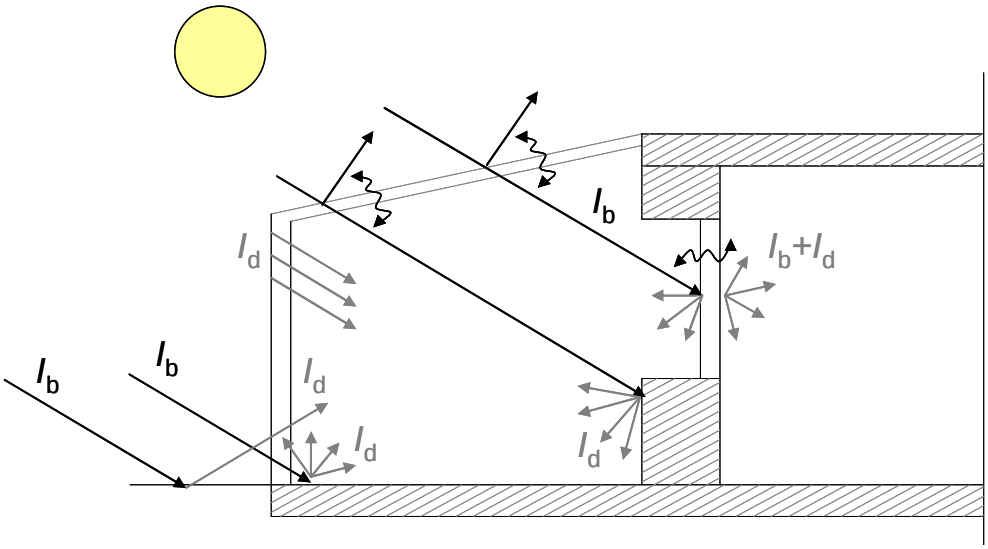



Figura 3.19. Schema della distribuzione della radiazione solare diretta ($I_b$) e diffusa ($I_d$) all'interno della serra solare e dell'ambiente adiacente secondo il modello di calcolo di *EnergyPlus*.

## 3.5 Analisi parametrica

Al fine di validare il metodo della norma UNI EN ISO 13790 per il calcolo degli apporti solari entranti all'interno di un ambiente climatizzato attraverso una serra solare addossata, si è effettuato un confronto con il modello dinamico del software *EnergyPlus* (figura 3.20). L'analisi del caso studio è stata condotta per un intero anno: ciò ha permesso di confrontare i valori medi mensili degli apporti solari calcolati attraverso la norma UNI EN ISO 13790 e attraverso *EnergyPlus*.

Il modulo analizzato è caratterizzato da una superficie netta di 24 $m^2$ di cui 13 $m^2$ di ambiente climatizzato e 11 $m^2$ di spazio non climatizzato (serra solare). Il volume totale è di 58 $m^3$ di cui 35 $m^3$ di ambiente climatizzato e 23 $m^3$ di serra solare. La serra solare è orientata a Sud.

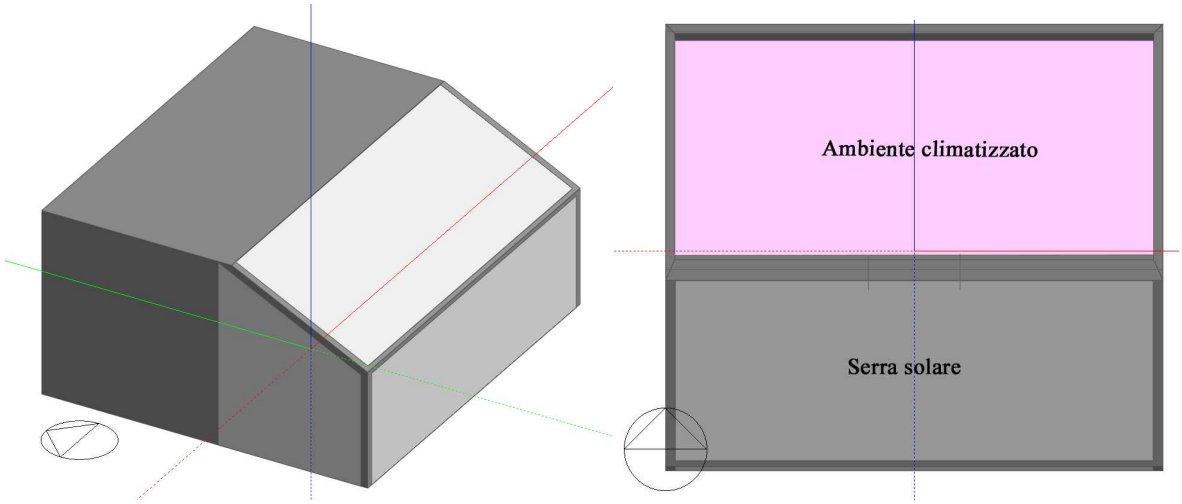



Figura 3.20. Modello 3D e pianta della serra solare addossata ad ambiente climatizzato.

Le pareti opache sono costituite da laterizio portante con isolamento termico a cappotto. Sono stati analizzati due diversi livelli di isolamento termico a parete in modo tale da ottenere una trasmittanza termica media dell'involucro disperdente pari a 0,30 W/($m^2$K) e pari a 0,15 W/($m^2$K).

La stratigrafia dei componenti d'involucro opaco è riportata in tabella 3.1.

Tabella 3.1. Stratigrafia dei componenti di involucro opaco.

| | Strati | Spessore [cm] | Densità [kg/$m^3$] | Conducibilità termica [W/(m K)] | Calore specifico [J/(kg K)] |
|---|---|---|---|---|---|
| Parete esterna | Intonaco | 1,5 | 1200 | 0,90 | 1000 |
| | Laterizio | 30 | 890 | 0.21 | 840 |
| | Isolante termico | 6,5 19 | 36 | 0,038 | 1453 |
| | Intonaco | 0,02 | 1200 | 0,90 | 1000 |
| Partizione verticale | Intonaco | 1,5 | 1200 | 0,90 | 1000 |
| | Laterizio | 30 | 890 | 0,21 | 840 |
| | Isolante termico | 6,5 19 | 36 | 0,038 | 1453 |
| | Intonaco | 0,02 | 1200 | 0,90 | 1000 |
| Copertura | Solaio latero-cemento | 22 | 1214 | 0,667 | 840 |
| | Membrana bituminosa | 0,3 | 1100 | 0,23 | 1000 |
| | Isolante termico | 10 | 35 | 0,035 | 1400 |
| | Guaina impermeabile | 0,4 | 1200 | 0,23 | 920 |
| | Strato di rivestimento | 2 | 2000 | 1 | 800 |

| | Strati | Spessore [cm] | Densità [kg/m$^3$] | Conducibilità termica [W/(m K)] | Calore specifico [J/(kg K)] |
|---|---|---|---|---|---|
| Pavimento controterra | Pavimentazione | 2 | 550 | 1 | 800 |
| | Massetto | 6 | 2000 | 1,4 | 880 |
| | Guaina impermeabile | 0,4 | 100 | 0,23 | 1410 |
| | Isolante termico | 10 | 40 | 0,035 | 1600 |
| | Solaio in calcestruzzo | 20 | 2000 | 1,16 | 920 |

Il caso di studio è stato analizzato al variare del coefficiente di assorbimento solare delle pareti opache che circondano la serra solare (pavimento e parete di separazione tra serra solare e ambiente climatizzato), considerando in particolare i seguenti valori del coefficiente di assorbimento solare $\alpha_{p,j}$: 0,3 – 0,6 – 0,9.

Sono stati analizzati due tipologie di vetro: un doppio vetro basso emissivo caratterizzato da una trasmittanza solare totale per incidenza normale $g_{gl,n}$ = 0,79 e un triplo vetro basso emissivo con $g_{gl,n}$ = 0,69.

Infine, sono stati ipotizzati diversi rapporti tra superficie di partizione vetrata e partizione opaca (al netto delle aperture vetrate) rispettivamente pari a $A_w/A_p$ = 0,22 – 0,27 – 0,35 – 0,80 – 2,48. Tali rapporti sono riportati in figura 3.21. In tabella 3.2 sono schematizzati i parametri considerati per le simulazioni.

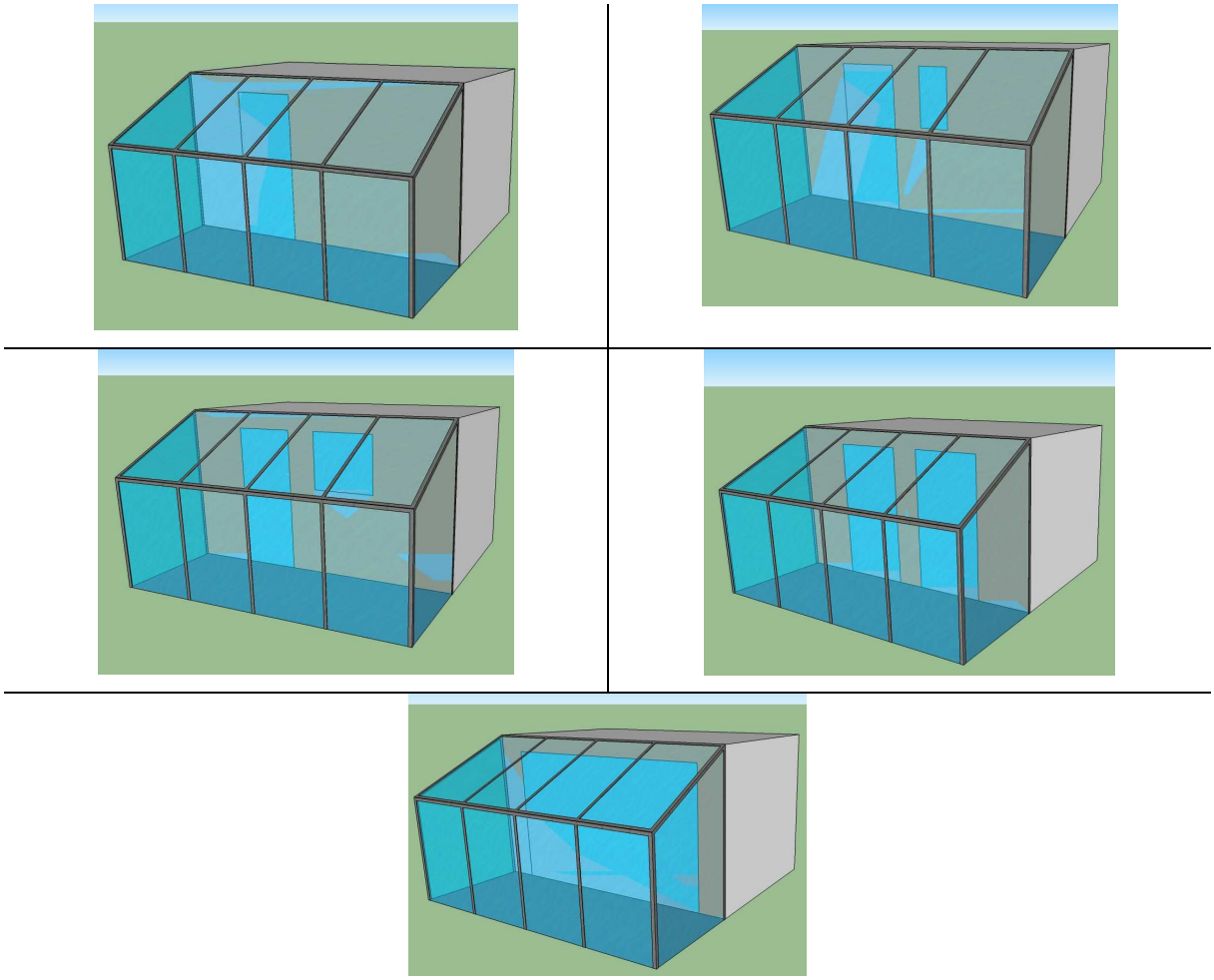


Figura 3.21. Modello della serra solare con indicazione dell'area vetrata ($A_w$) e dell'area opaca ($A_p$)

Tabella 3.2. Parametri considerati per le simulazioni.

| Parametro | Unità di misura | Valori |
|---|---|---|
| $A_w/A_p$ | [-] | 0,22-0,27-0,35-0,8-2,48 |
| $\alpha_{p,j}$ | [-] | 0,3-0,6-0,9 |
| $g_{gl,n}$ | [-] | 0,76-0,69 |
| $U_p$ | [W/(m$^2$K)] | 0,3-0,15 |

Non sono stati considerati né ventilazione né apporti interni. Inoltre non è stato considerato alcun sistema di schermatura solare.

Si suppone che l'impianto di riscaldamento e di raffrescamento abbiano un funzionamento continuo e operino al fine di mantenere una temperatura di *setpoint* pari a 20°C in periodo invernale e 26°C in periodo estivo.

Il calcolo è stato effettuato per due città localizzate alle latitudini estreme del territorio nazionale, ovvero per Catania (latitudine 37°30' N) e Bolzano (latitudine 46°29' N).

Il periodo invernale di riscaldamento è stato fissato secondo quanto previsto dal D.P.R. 412/1993: per Bolzano (zone climatica E) il periodo ha inizio il 15 ottobre e fine il 15 aprile e per Catania (zona climatica B) il periodo ha inizio il 1° dicembre e fine il 31 marzo.

Al fine di confrontare i modelli di calcolo presi in considerazione, sono state valutate le opzioni per la congruenza dei modelli che si elencano di seguito rimandando al capitolo 1, paragrafo 1.3 per un'analisi più dettagliata:

- i dati climatici sono stati resi omogenei. In particolare i valori medi mensili dei dati climatici sono stati ricavati attraverso *EnergyPlus* (G. De Giorgio) e sono stati inseriti all'interno del modello di calcolo della UNI EN ISO 13790. In particolare i valori di *I* nelle equazioni 3.10 e 3.15 sono stati ricavati dall'irradianza solare totale incidente sulle superfici esterne della serra;
- sono stati trascurati i flussi termici multidimensionali attraverso i ponti termici all'interno del calcolo del coefficiente di accoppiamento termico *H* dal momento che *EnergyPlus* non ne permette il calcolo. I calcoli sono stati svolti considerando le dimensioni interne;
- al fine di calcolare lo scambio termico attraverso componenti a contatto con il terreno, *EnergyPlus* utilizza come dati di ingresso la temperatura superficiale del terreno mentre il metodo semplificato utilizza una trasmittanza termica equivalente del sistema componente – terreno. Per il confronto tra modelli è stata calcolata una trasmittanza termica equivalente ed è stata introdotta in *EnergyPlus* inserendo, al pari della norma UNI EN ISO 13370 una temperatura pari alla temperatura esterna media mensile;
- al fine di calcolare i valori di trasmittanza termica dei componenti di involucro opaco e trasparente, sono stati calcolati i coefficienti di scambio termico liminare esterno attraverso *EnergyPlus* ed introdotti all'interno del metodo semplificato. Non è stato possibile effettuare lo stesso procedimento per i coefficienti di scambio termico liminare interno in quanto *EnergyPlus*

separa la componente di scambio termico radiativa con le superfici interne dalla componente di scambio termico convettiva con l'aria dell'ambiente interno;

- per assicurare la stessa trasmittanza solare totale per incidenza normale, il coefficiente di trasmissione solare e il coefficiente di riflessione solare sono stati inseriti in *EnergyPlus* come valori medi per tutte le lunghezze d'onda. Inoltre, al fine di tenere in considerazione i diversi angoli di incidenza della radiazione solare è stato calcolato il fattore di esposizione $F_w$ medio mensile come rapporto tra il coefficiente di trasmissione solare medio ($\tau_m$) e il coefficiente di trasmissione solare per incidenza normale ($\tau_n$) (Corrado e Serra, 1997). La trasmittanza solare totale per incidenza normale ($g_{gl,n}$) è stata quindi moltiplicata per il valore medio mensile di $F_w$;
- il coefficiente di assorbimento solare delle superfici interne (sia dell'ambiente climatizzato che della serra solare) è stato posto pari a 1 al fine di non considerare la quota riflessa dalle superfici stesse;
- l'albedo del terreno è stato posto pari a zero in quanto la metodologia della UNI EN ISO 13790 non considera la quota di energia solare riflessa dal terreno.

Al fine di considerare la radiazione solare entrante all'interno dell'ambiente climatizzato attraverso la serra solare, è stata selezionata la modalità di calcolo *Full interior and exterior with reflection* mentre il calcolo dello scambio conduttivo attraverso i componenti di involucro è stato effettuato attraverso le funzioni di trasferimento.

Al fine di calcolare gli apporti solari attraverso il modello di simulazione dinamico e di confrontarli con le quote $Q_{sd,w}$ (secondo l'equazione 3.11), $Q_{sd,p}$ (secondo l'equazione 3.12) e $Q_{si}$ (secondo l'equazione 3.15):

- è stata ricavata attraverso *EnergyPlus* l'energia solare entrante all'interno dell'ambiente climatizzato attraverso la finestra scomposta nelle due quote diretta e diffusa (*Zone beam solar from interior windows* e *Zone diffuse solar from interior windows*). La somma delle due componenti è stata confrontata con $Q_{sd,w}$;
- al fine di calcolare gli apporti derivanti dalla radiazione solare incidente sulle pareti opache le quali cedono calore alla serra e quest'ultima, riscaldata, cede calore per trasmissione all'ambiente climatizzato, sono state effettuate due simulazioni: la prima simulazione eliminando gli apporti solari (attraverso la funzione *no sun* per ogni superficie di involucro) al fine di separare la quota di scambio termico per conduzione dovuta alla differenza di temperatura tra interno e serra solare ($q'_c$) dalla quota di scambio termico dovuta all'effetto della radiazione solare incidente sulla parete; la seconda considerando anche la radiazione solare al fine di valutarne gli effetti sullo scambio termico attraverso la parete ($q_c$).

La media mensile della differenza degli scambi termici per conduzione $q_c$ e $q`_c$ orari calcolati attraverso la parete che separa l'ambiente climatizzato dalla serra solare è stato pertanto confrontata

con $Q_{sd,p}$ + $Q_{si}$. In figura 3.22 sono rappresentati i flussi termici per conduzione in presenza di radiazione solare (figura a sinistra) ed in assenza (figura a destra).

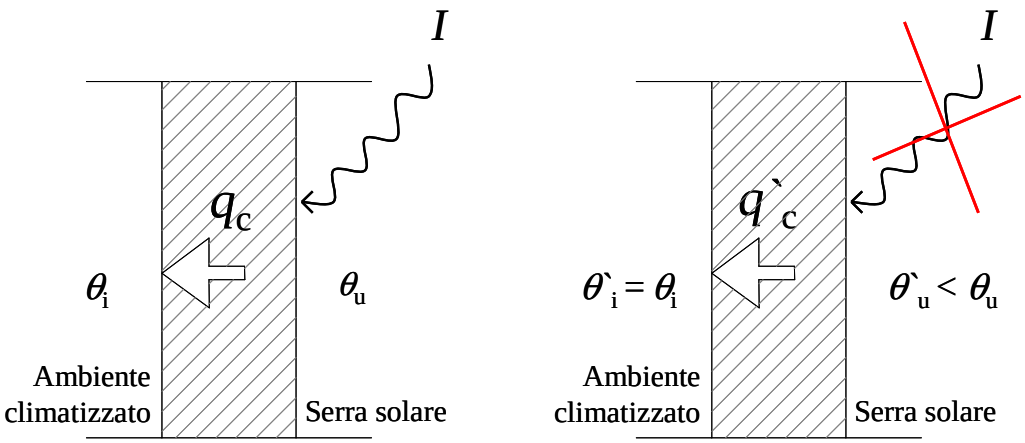



Figura 3.22. Scambio termico per conduzione attraverso la parete di partizione opaca considerando la radiazione solare (sinistra) e trascurandola (destra).

Sono state condotte in tutto 120 simulazioni (60 per Catania e 60 per Bolzano) al fine di calcolare, per ogni mese dell'anno, gli apporti solari entranti all'interno dell'ambiente climatizzato attraverso la serra solare. In tabella 3.3 vengono riportati gli scostamenti percentuali tra il calcolo secondo la UNI EN ISO 13790 ed *EnergyPlus*. Si ricorda che $Q_{sd}$+$Q_{si}$ sono gli apporti entranti in ambiente climatizzato dovuti

- all'incremento della temperatura superficiale della parete opaca di separazione tra la serra solare e l'ambiente climatizzato per effetto della radiazione solare incidente ($Q_{si}$) che instaura scambi termici per trasmissione verso l'ambiente climatizzato;
- all'incremento della temperatura dell'aria all'interno della serra dovuta al fatto che le pareti che ricevono la radiazione solare aumentano la loro temperatura superficiale e cedono calore all'ambiente della serra. Questo fenomeno provoca un incremento degli scambi termici per trasmissione tra l'ambiente serra e l'ambiente climatizzato ($Q_{si}$).

$Q_{sd,w}$ sono gli apporti solari diretti attraverso la parete di partizione vetrata e $Q_{ss}$ sono gli apporti solari totali.

Tabella 3.3. Differenza percentuale media annuale tra gli apporti solari calcolati secondo la UNI EN ISO 13790 ed *EnergyPlus*

| | | | | | Scostamento percentuale [%] | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **N. simulaz.** | $A_w/A_p$ [-] | $g_{gl,n}$ [-] | $U_p$ [W/(m$^2$ K)] | $\alpha_p$ [-] | **Catania** | | | **Bolzano** | | |
| | | | | | $Q_{sd,p}$+$Q_{si}$ | $Q_{sd,w}$ | $Q_{ss}$ | $Q_{sd,p}$+$Q_{si}$ | $Q_{sd,w}$ | $Q_{ss}$ |
| 1 | 0,22 | 0,76 | 0,30 | 0,30 | -24% | 7% | -11% | -31% | 12% | -13% |
| 2 | 0,27 | 0,76 | 0,30 | 0,30 | -14% | 13% | -2% | -22% | 16% | -4% |
| 3 | 0,35 | 0,76 | 0,30 | 0,30 | -1% | 8% | 4% | -11% | 14% | 3% |
| 4 | 0,80 | 0,76 | 0,30 | 0,30 | 67% | -19% | 1% | 50% | -15% | 0% |

| | | | | | Scostamento percentuale [%] | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **N. simulaz.** | $A_w/A_D$ [-] | $g_{gl,n}$ [-] | $U_D$ [W/(m$^2$ K)] | $\alpha_D$ [-] | **Catania** | | | **Bolzano** | | |
| | | | | | $Q_{sd,p}+Q_{si}$ | $Q_{sd,w}$ | $Q_{ss}$ | $Q_{sd,p}+Q_{si}$ | $Q_{sd,w}$ | $Q_{ss}$ |
| 5 | 2,48 | 0,76 | 0,30 | 0,30 | 313% | 22% | 46% | 264% | 27% | 47% |
| 6 | 0,22 | 0,76 | 0,30 | 0,60 | 14% | 28% | 17% | 4% | 28% | 11% |
| 7 | 0,27 | 0,76 | 0,30 | 0,60 | 28% | 36% | 29% | 17% | 34% | 23% |
| 8 | 0,35 | 0,76 | 0,30 | 0,60 | 46% | 27% | 36% | 33% | 29% | 31% |
| 9 | 0,80 | 0,76 | 0,30 | 0,60 | 142% | -5% | 43% | 120% | -4% | 35% |
| 10 | 2,48 | 0,76 | 0,30 | 0,60 | 479% | 40% | 98% | 420% | 42% | 88% |
| 11 | 0,22 | 0,76 | 0,30 | 0,90 | 46% | 64% | 47% | 34% | 53% | 38% |
| 12 | 0,27 | 0,76 | 0,30 | 0,90 | 64% | 80% | 62% | 51% | 60% | 52% |
| 13 | 0,35 | 0,76 | 0,30 | 0,90 | 87% | 57% | 72% | 71% | 51% | 63% |
| 14 | 0,80 | 0,76 | 0,30 | 0,90 | 133% | 18% | 63% | 178% | 11% | 76% |
| 15 | 2,48 | 0,76 | 0,30 | 0,90 | 614% | 69% | 168% | 545% | 60% | 139% |
| 16 | 0,22 | 0,69 | 0,30 | 0,30 | -31% | 26% | -12% | -39% | 30% | -16% |
| 17 | 0,27 | 0,69 | 0,30 | 0,30 | -22% | 31% | -2% | -31% | 35% | -6% |
| 18 | 0,35 | 0,69 | 0,30 | 0,30 | -11% | 28% | 7% | -22% | 32% | 3% |
| 19 | 0,80 | 0,69 | 0,30 | 0,30 | 46% | -4% | 11% | 28% | -1% | 8% |
| 20 | 2,48 | 0,69 | 0,30 | 0,30 | 245% | 44% | 69% | 196% | 49% | 67% |
| 21 | 0,22 | 0,69 | 0,30 | 0,60 | 8% | 51% | 18% | -3% | 50% | 10% |
| 22 | 0,27 | 0,69 | 0,30 | 0,60 | 22% | 61% | 31% | 9% | 56% | 23% |
| 23 | 0,35 | 0,69 | 0,30 | 0,60 | 35% | 50% | 40% | 24% | 51% | 34% |
| 24 | 0,80 | 0,69 | 0,30 | 0,60 | 125% | 12% | 57% | 100% | 12% | 47% |
| 25 | 2,48 | 0,69 | 0,30 | 0,60 | 426% | 66% | 130% | 360% | 66% | 116% |
| 26 | 0,22 | 0,69 | 0,30 | 0,90 | 42% | 94% | 49% | 28% | 78% | 37% |
| 27 | 0,27 | 0,69 | 0,30 | 0,90 | 60% | 113% | 65% | 44% | 87% | 53% |
| 28 | 0,35 | 0,69 | 0,30 | 0,90 | 81% | 85% | 79% | 63% | 76% | 66% |
| 29 | 0,80 | 0,69 | 0,30 | 0,90 | 192% | 40% | 109% | 161% | 30% | 90% |
| 30 | 2,48 | 0,69 | 0,30 | 0,90 | 572% | 101% | 209% | 493% | 87% | 174% |
| 31 | 0,22 | 0,76 | 0,15 | 0,30 | 12% | 7% | 9% | 1% | 12% | 7% |
| 32 | 0,27 | 0,76 | 0,15 | 0,30 | 32% | 13% | 19% | 18% | 16% | 16% |
| 33 | 0,35 | 0,76 | 0,15 | 0,30 | 87% | 8% | 31% | 68% | 14% | 30% |
| 34 | 0,80 | 0,76 | 0,15 | 0,30 | 125% | -19% | 7% | 160% | -15% | 9% |
| 35 | 2,48 | 0,76 | 0,15 | 0,30 | 679% | 22% | 52% | 585% | 27% | 52% |
| 36 | 0,22 | 0,76 | 0,15 | 0,60 | 68% | 28% | 48% | 52% | 28% | 40% |
| 37 | 0,27 | 0,76 | 0,15 | 0,60 | 96% | 36% | 62% | 78% | 34% | 54% |
| 38 | 0,35 | 0,76 | 0,15 | 0,60 | 132% | 27% | 67% | 110% | 29% | 61% |
| 39 | 0,80 | 0,76 | 0,15 | 0,60 | 322% | -5% | 64% | 282% | -4% | 53% |
| 40 | 2,48 | 0,76 | 0,15 | 0,60 | 992% | 40% | 111% | 879% | 42% | 99% |
| 41 | 0,22 | 0,76 | 0,15 | 0,90 | 116% | 64% | 91% | 97% | 53% | 78% |
| 42 | 0,27 | 0,76 | 0,15 | 0,90 | 152% | 80% | 112% | 130% | 60% | 96% |
| 43 | 0,35 | 0,76 | 0,15 | 0,90 | 197% | 57% | 120% | 171% | 51% | 105% |
| 44 | 0,80 | 0,76 | 0,15 | 0,90 | 433% | 18% | 132% | 384% | 11% | 106% |
| 45 | 2,48 | 0,76 | 0,15 | 0,90 | 1247% | 69% | 196% | 1114% | 60% | 157% |
| 46 | 0,22 | 0,69 | 0,15 | 0,30 | 1% | 26% | 13% | -11% | 30% | 8% |
| 47 | 0,27 | 0,69 | 0,15 | 0,30 | 19% | 33% | 25% | 4% | 35% | 21% |
| 48 | 0,35 | 0,69 | 0,15 | 0,30 | 40% | 28% | 32% | 23% | 32% | 29% |
| 49 | 0,80 | 0,69 | 0,15 | 0,30 | 155% | -4% | 27% | 122% | -1% | 23% |
| 50 | 2,48 | 0,69 | 0,15 | 0,30 | 336% | 44% | 72% | 457% | 49% | 77% |
| 51 | 0,22 | 0,69 | 0,15 | 0,60 | 59% | 51% | 54% | 44% | 50% | 45% |
| 52 | 0,27 | 0,69 | 0,15 | 0,60 | 86% | 61% | 71% | 66% | 56% | 60% |

| | | | | | Scostamento percentuale [%] | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **N. simulaz.** | $A_w/A_p$ [-] | $g_{gl,n}$ [-] | $U_p$ [W/(m$^2$ K)] | $\alpha_p$ [-] | **Catania** | | | **Bolzano** | | |
| | | | | | $Q_{sd,p}+Q_{si}$ | $Q_{sd,w}$ | $Q_{ss}$ | $Q_{sd,p}+Q_{si}$ | $Q_{sd,w}$ | $Q_{ss}$ |
| 53 | 0,35 | 0,69 | 0,15 | 0,60 | 120% | 50% | 81% | 95% | 51% | 71% |
| 54 | 0,80 | 0,69 | 0,15 | 0,60 | 294% | 12% | 87% | 248% | 12% | 73% |
| 55 | 2,48 | 0,69 | 0,15 | 0,60 | 891% | 66% | 152% | 805% | 73% | 145% |
| 56 | 0,22 | 0,69 | 0,15 | 0,90 | 110% | 94% | 99% | 88% | 78% | 83% |
| 57 | 0,27 | 0,69 | 0,15 | 0,90 | 145% | 113% | 123% | 119% | 87% | 104% |
| 58 | 0,35 | 0,69 | 0,15 | 0,90 | 188% | 85% | 137% | 157% | 76% | 118% |
| 59 | 0,80 | 0,69 | 0,15 | 0,90 | 410% | 40% | 163% | 354% | 30% | 133% |
| 60 | 2,48 | 0,69 | 0,15 | 0,90 | 1168% | 101% | 252% | 1014% | 87% | 203% |

Lo scostamento varia da un massimo di 252% (simulazione 60, Catania) a un minimo dello 0% (simulazione 4, Bolzano).

In figura 3.23 sono indicati gli scostamenti percentuali in funzione del parametro $A_w/A_p$. Dalla figura emerge che quanto più il valore di tale rapporto è elevato, tanto più lo scostamento percentuale cresce. I valori più elevati si hanno infatti per $A_w/A_p$ = 2,48 ($\Delta_{max}$ = 252%) ovvero quando la superficie di partizione vetrata è maggiore della superficie opaca. Inoltre, gli apporti che maggiormente si discostano sono quelli attraverso l'involucro opaco.

Dalle tabelle 3.4, 3.5 e 3.6 è inoltre possibile quindi notare gli scostamenti percentuali al variare di ogni parametro individuato. Lo scostamento medio per $A_w/A_p$ = 0,22 è 31% mentre tale percentuale aumenta all'aumentare di tale rapporto: per $A_w/A_p$ = 0,27, $\Delta Q_{ss}$ = 45%, per $A_w/A_p$ = 0,35, $\Delta Q_{ss}$ = 55%, per $A_w/A_p$ = 0,80, $\Delta Q_{ss}$ = 68%, per $A_w/A_p$ = 2,48, $\Delta Q_{ss}$ = 122%.

Infatti, maggiore è l'area vetrata tra la serra e l'ambiente interno, maggiore è la quota di radiazione solare che viene riflessa dalle superfici interne e viene riemessa dai vetri verso l'esterno. Di questo fenomeno fisico il metodo semplificato non tiene conto e considera invece che tutta la radiazione solare incidente sulle superfici interne viene assorbita e riemessa all'interno dell'ambiente essendo $\alpha = \varepsilon$. Pertanto, maggiore è l'area vetrata, più il calcolo semplificato sovrastima gli apporti solari.

Per quanto riguarda la differenza tra metodi al variare della località climatica, non si riscontrano forti differenze nonostante per località con radiazione solare maggiore lo scostamento sia più elevato. In particolare lo scostamento medio per Bolzano è 58% mentre per Catania è 67%.

Un'altra variabile significativa risulta essere invece il coefficiente di assorbimento solare dell'involucro interno della serra: in particolare, più il coefficiente di assorbimento solare è basso (colori chiari), minore è lo scostamento percentuale tra i metodi. Per $\alpha_p$ = 0,3, il valor medio di $\Delta Q_{ss}$ è 19%, per $\alpha_p$ = 0,6, il valor medio di $\Delta Q_{ss}$ è 60%, per $\alpha_p$ = 0,9, il valor medio di $\Delta Q_{ss}$ è 108%.

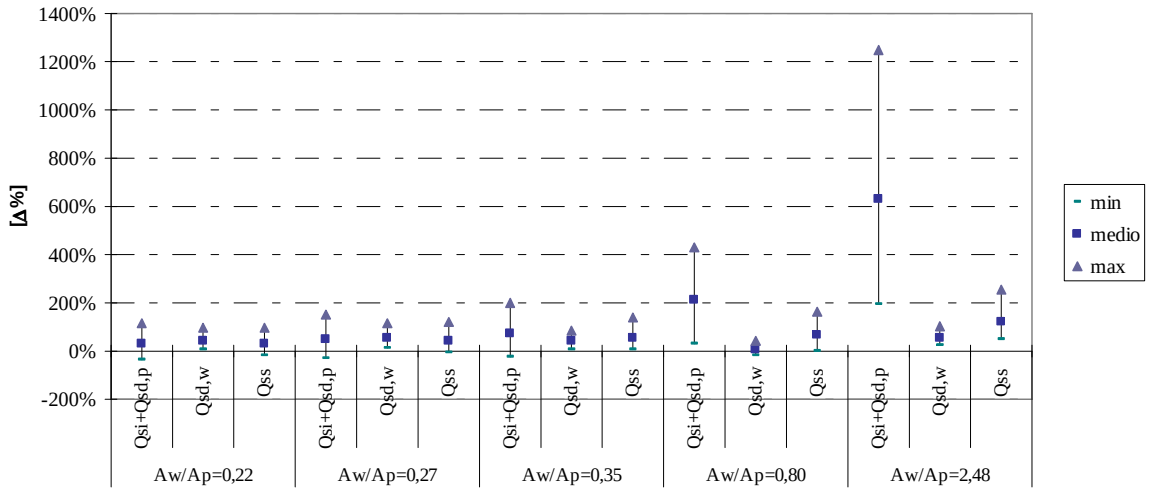



Figura 3.23. Scostamento percentuale minimo, medio e massimo tra gli apporti solari calcolati secondo la UNI EN ISO 13790 ed *EnergyPlus*.

Tabella 3.4. Differenza percentuale tra $Q_{si}+Q_{sd,p}$ calcolati secondo la UNI EN ISO 13790 ed *EnergyPlus* per ogni parametro analizzato.

| **Parametri** | ***Δ( $Q_{si}+Q_{sd,p}$ ) [%]*** | | |
|---|---|---|---|
| | **minima** | **medio** | **massima** |
| $A_w/A_p$ = 0,22 | -39% | 29% | 116% |
| $A_w/A_p$ = 0,27 | -31% | 48% | 152% |
| $A_w/A_p$ = 0,35 | -22% | 74% | 197% |
| $A_w/A_p$ = 0,80 | 28% | 215% | 433% |
| $A_w/A_p$ = 2,48 | 196% | 629% | 1247% |
| Catania | -31% | 208% | 1247% |
| Bolzano | -39% | 181% | 1114% |
| $U_p$ = 0,30 W/(m$^2$K) | -31% | 208% | 1247% |
| $U_p$ = 0,15 W/(m$^2$K) | -39% | 181% | 1114% |
| $g_{gl,n}$ = 0,76 | -31% | 209% | 1247% |
| $g_{gl,n}$ =0,69 | -39% | 180% | 1168% |
| $\alpha_p$ = 0,30 | -39% | 97% | 679% |
| $\alpha_p$ = 0,60 | -3% | 203% | 992% |
| $\alpha_p$ = 0,90 | 28% | 284% | 1247% |

Tabella 3.5. Differenza percentuale tra $Q_{sd,w}$ calcolati secondo la UNI EN ISO 13790 ed *EnergyPlus* per ogni parametro analizzato.

| **Parametri** | ***Δ($Q_{sd,w}$) [%]*** | | |
|---|---|---|---|
| | **minima** | **medio** | **massima** |
| $A_w/A_p$ = 0,22 | 7% | 44% | 94% |
| $A_w/A_p$ = 0,27 | 13% | 52% | 113% |
| $A_w/A_p$ = 0,35 | 8% | 42% | 85% |
| $A_w/A_p$ = 0,80 | -19% | 9% | 40% |
| $A_w/A_p$ = 2,48 | 22% | 56% | 101% |
| Catania | -19% | 42% | 113% |
| Bolzano | -15% | 39% | 87% |
| $U_p$ = 0,30 W/(m$^2$K) | -19% | 42% | 113% |
| $U_p$ = 0,15 W/(m$^2$K) | -15% | 39% | 87% |
| $g_{gl,n}$ = 0,76 | -19% | 29% | 80% |
| $g_{gl,n}$ =0,69 | -19% | 45% | 113% |
| $\alpha_p$ = 0,30 | -19% | 18% | 49% |
| $\alpha_p$ = 0,60 | -5% | 37% | 73% |
| $\alpha_p$ = 0,90 | 37% | 108% | 252% |

Tabella 3.6. Differenza percentuale tra $Q_{ss}$ calcolati secondo la UNI EN ISO 13790 ed *EnergyPlus* per ogni parametro analizzato.

| **Parametri** | ***Δ(Q<sub>ss</sub>) [%]*** | | |
|---|---|---|---|
| | **minima** | **medio** | **massima** |
| $A_w/A_p$ = 0,22 | -16% | 31% | 99% |
| $A_w/A_p$ = 0,27 | -6% | 45% | 123% |
| $A_w/A_p$ = 0,35 | 3% | 55% | 137% |
| $A_w/A_p$ = 0,80 | 0% | 68% | 163% |
| $A_w/A_p$ = 2,48 | 46% | 122% | 252% |
| Catania | -12% | 67% | 252% |
| Bolzano | -16% | 58% | 203% |
| $U_p$ = 0,30 W/(m$^2$K) | -12% | 67% | 252% |
| $U_p$ = 0,15 W/(m$^2$K) | -16% | 58% | 203% |
| $g_{gl,n}$ = 0,76 | -13% | 56% | 196% |
| $g_{gl,n}$ =0,69 | -16% | 69% | 252% |
| $\alpha_p$ = 0,30 | -16% | 19% | 77% |
| $\alpha_p$ = 0,60 | 10% | 60% | 152% |
| $\alpha_p$ = 0,90 | 11% | 66% | 113% |

Se si considerano i valori medi mensili, si può notare che in quasi tutti i casi considerati gli scostamenti tra i metodi risultano minori durante i mesi invernali mentre sono molto elevati durante i mesi estivi con differenze massime localizzate principalmente durante il mese di giugno. Nelle figure 3.19, 3.20 e 3.21 sono indicati gli andamenti mensili degli apporti solari calcolati con entrambi i metodi. In queste figure gli apporti solari entranti attraverso l'involucro trasparente sono stati scomposti nelle quote diretta e diffusa.

A parte il caso di studio 2 (figura 3.24), si può notare come nei casi 7 e 12 (figure 3.25 e 3.26) gli scostamenti tra i metodi, sia per quanto riguarda la quota attraverso la partizione opaca sia attraverso quella vetrata, sono maggiori nei mesi estivi. Lo stesso risulta dall'analisi dei restanti casi.

Questo dato risulta anche dalle figure 3.27 e 3.28 dove sono indicati gli apporti solari calcolati per la località di Catania rispettivamente per il mese di gennaio e di giugno. Da quanto risulta, durante il mese di gennaio, gli apporti solari totali calcolati con i due metodi sono molto più prossimi tra loro rispetto al mese di giugno, se si escludono i 12 casi con elevato rapporto di $A_w/A_p$ cerchiati in grigio.

Inoltre, in entrambi i mesi, risulta evidente come gli apporti solari attraverso l'involucro vetrato calcolati con entrambi i metodi siano prossimi tra loro, mentre la differenza maggiore risulta per gli apporti solari attraverso l'involucro opaco.

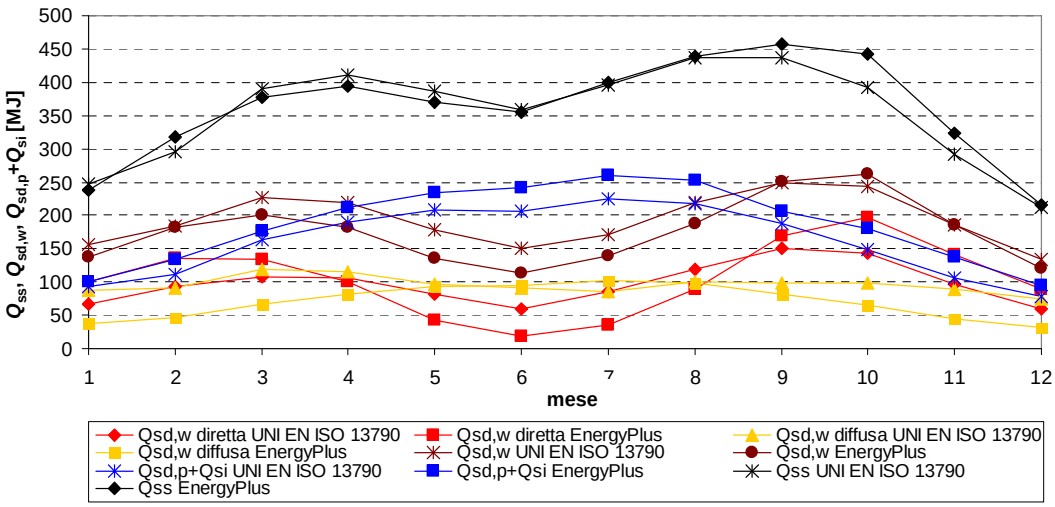



Figura 3.24. Confronto tra gli apporti solari medi mensili (caso di studio 2).

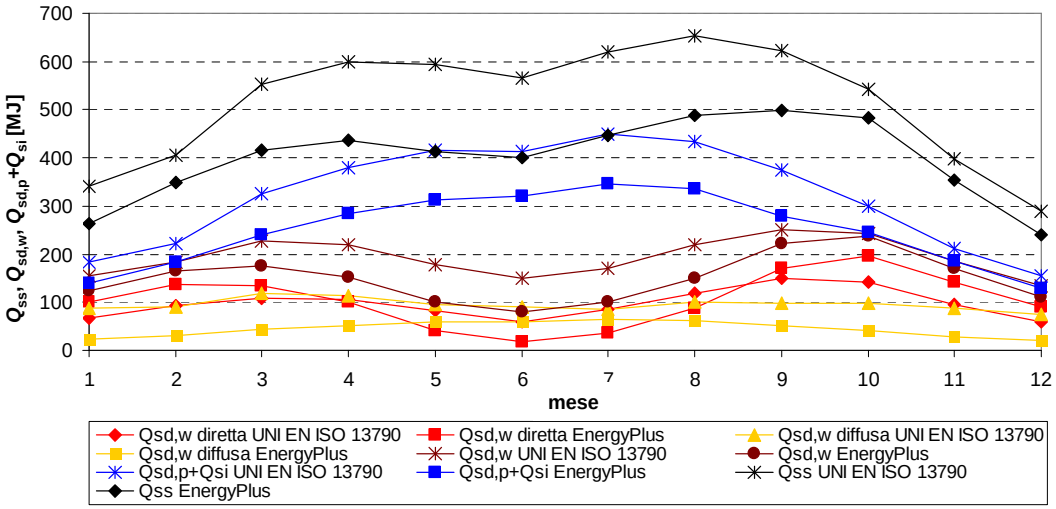



Figura 3.25. Confronto tra gli apporti solari medi mensili (caso di studio 7).

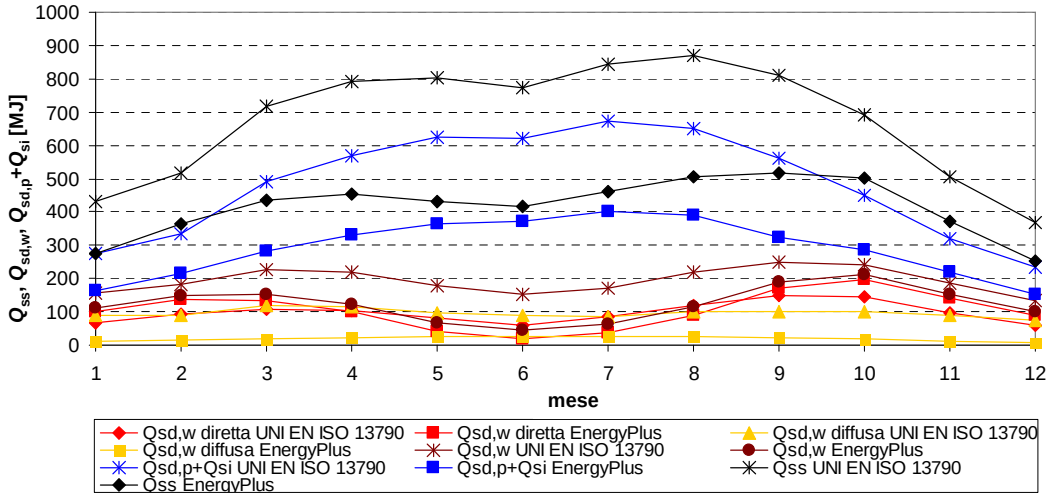



Figura 3.26. Confronto tra gli apporti solari medi mensili (caso di studio 12).

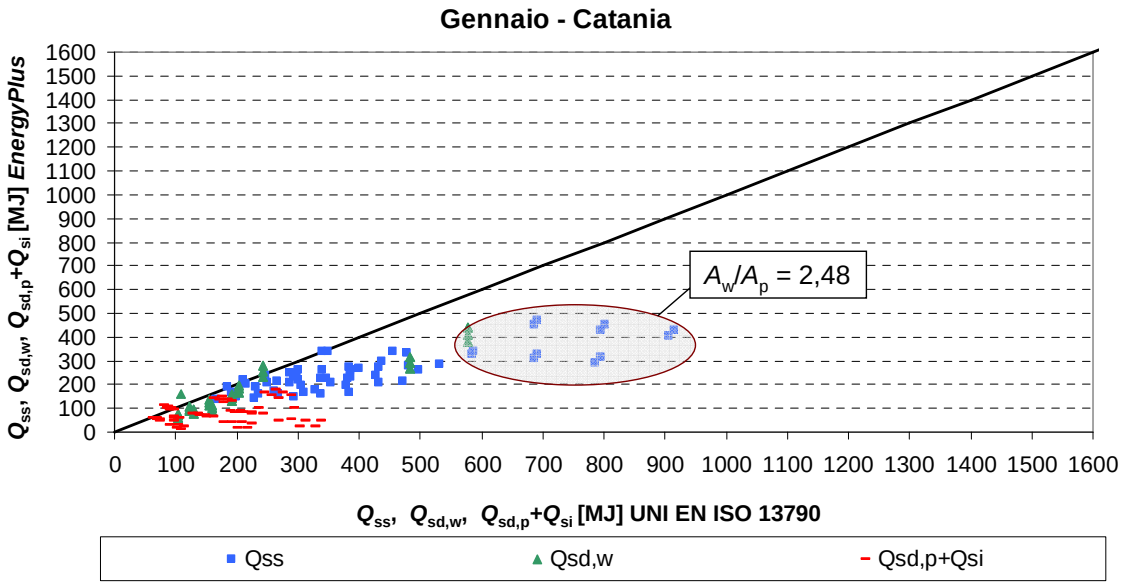



Figura 3.27. Confronto tra apporti solari calcolati con metodo UNI EN ISO 13790 ed *EnergyPlus* (mese di gennaio – Catania)

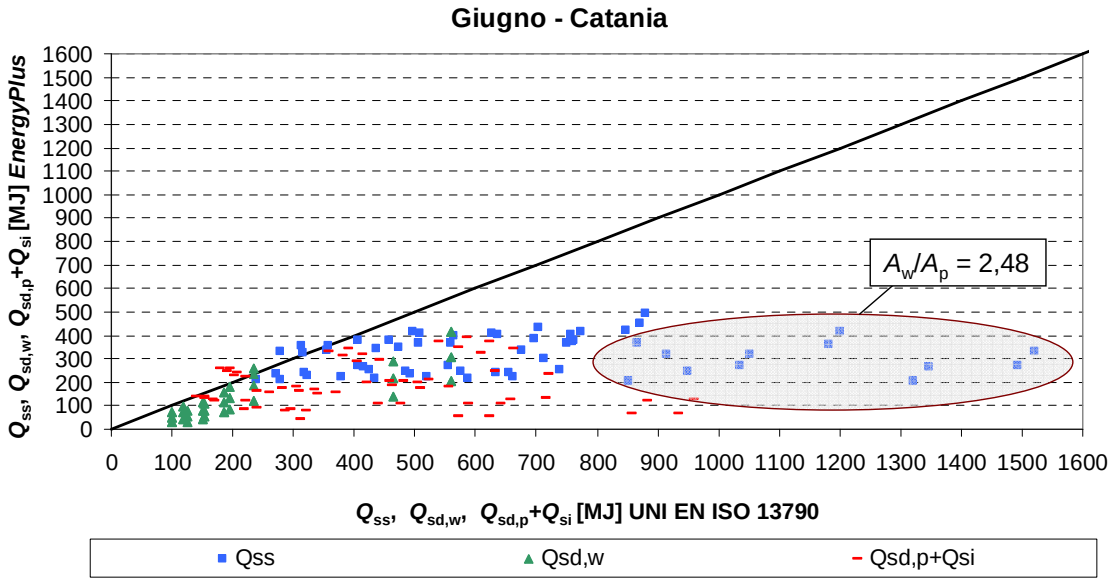



Figura 3.28. Confronto tra apporti solari calcolati con metodo UNI EN ISO 13790 ed *EnergyPlus* (mese di giugno – Catania)

In generale risulta che:

- lo scostamento percentuale tra i metodi è in generale elevato ($\Delta Q_{ss}$ medio = 62%);
- lo scostamento percentuale tra i metodi risulta maggiore durante i mesi estivi (giugno in particolare) e minore durante i mesi invernali;

- il metodo semplificato approssima meglio il metodo dinamico in caso in cui la partizione tra ambiente climatizzato e serra solare sia caratterizzata da un rapporto $A_w/A_p$ basso e qualora il coefficiente di assorbimento solare dell'involucro opaco sia basso (colore chiaro);
- la località, la tipologia di vetro e la trasmittanza termica della parete opaca di partizione non sono parametri che influenzano sensibilmente la differenza tra i metodi;
- dall'analisi dell'andamento mensile dei risultati (come riportato nelle figure 3.24, 3.25 e 3.26) risulta che il metodo semplificato sovrastima gli apporti solari diretti nei mesi estivi, mentre li sottostima durante i mesi invernali; d'altro canto sovrastima particolarmente nei mesi estivi gli apporti solari attraverso il componente opaco. Ne risulta che durante l'inverno gli effetti si compensano e la differenza tra il valore totale ($Q_{ss}$) risulta minore, mentre in estate gli effetti si sommano provocando una sovrastima dei valori totali.
- in generale il metodo semplificato sovrastima gli apporti solari totali entranti in ambiente climatizzato attraverso la serra solare ($Q_{ss}$), sia in periodo estivo che in periodo invernale.

È bene sottolineare che il caso di studio individuato è un modello alquanto semplice di serra solare individuato al fine di effettuare primi confronti tra metodologie di calcolo.
Al fine di limitare le cause degli scostamenti tra metodi di calcolo, ed indagare pertanto i meccanismi di scambio termico di un modello semplice, non è stato previsto alcun dispositivo per evitare il surriscaldamento all'interno della serra solare e dell'ambiente adiacente in periodo estivo, quali schermature solari o un adeguato sistema di ventilazione.
Questa prima fase di analisi è stata rivolta pertanto all'individuazione della metodologia di calcolo e all'applicazione di questa ad un semplice caso di studio.
Si ritiene necessario ampliare tale indagine al fine di valutare il confronto tra metodologie di calcolo introducendo altre variabili progettuali.

## 3.6 Analisi dell'incidenza delle serre solari sul fabbisogno energetico dell'edificio

Dopo aver analizzato le differenze tra il metodo di calcolo della UNI EN ISO 13790 e il modello di calcolo implementato in *EnergyPlus* in termini di apporti solari, si sono analizzate le differenze in termini di fabbisogno di energia netta di un edificio in presenza di serra solare addossata. Le metodologie considerate sono:
- metodo di calcolo mensile quasi stazionario della UNI EN ISO 13790;
- metodo di calcolo orario semplificato della UNI EN ISO 13790;
- metodo dinamico implementato in *EnergyPlus*.

In particolare, per i primi due metodi analizzati, si è utilizzata la procedura di calcolo contenuta all'interno dell'appendice E (cfr. sottoparagrafo 3.3.1) per il calcolo degli apporti solari entranti all'interno dell'ambiente climatizzato.

Successivamente, per quanto riguarda il calcolo medio mensile, gli apporti solari $Q_{ss}$ sono stati sommati agli apporti solari $Q_{sol}$ calcolati secondo il metodo illustrato all'interno del sottoparagrafo 1.2.1 e pertanto moltiplicati al fattore di utilizzazione; per quanto riguarda il metodo orario semplificato, sono stati calcolati i flussi solari attraverso la serra come:

$$\Phi_{ss} = \Phi_{sd} + \Phi_{si} \tag{3.26}$$

I flussi solari orari così calcolati sono stati sommati ai flussi solari $\Phi_{sol}$ e sono stati, al pari di questi ultimi, ripartiti tra il nodo dell'aria interna dell'ambiente climatizzato, il nodo della superficie dell'involucro e il nodo della massa (cfr. sottoparagrafo 1.2.2).

Un ulteriore confronto ha riguardato la temperatura interna della serra solare.

Secondo il metodo orario semplificato, la temperatura interna della serra è stata calcolata, ora per ora, a partire dalla seguente equazione

$$\theta_{serra} = \frac{\Phi_{serra} + \theta_{int} \cdot H_{iu} + \theta_e \cdot H_{ue}}{H_{iu} + H_{ue}} \tag{3.27}$$

come riportato nell'equazione 3.18, in accordo con la norma UNI EN ISO 13789 dove gli apporti solari che entrano all'interno della serra solare ($\Phi_{serra}$) sono calcolati come

$$\Phi_{serra} = F_{sh,e} \cdot (1 - F_{F,e}) \cdot g_e \cdot \sum_j (I_j \cdot \alpha_j \cdot A_j) - F_{sh,e} \cdot (1 - F_{F,e}) \cdot g_e \cdot \alpha_p \cdot A_p \cdot \frac{H_{p,tot}}{H_{p,e}} \cdot I_p \tag{3.28}$$

Il caso di studio considerato consiste nella stessa palazzina residenziale analizzata all'interno del paragrafo 1.4 alla quale sono state addossate 6 serre solari in corrispondenza della parete orientata a Sud. È stata quindi analizzato il locale in corrispondenza di una delle serre solari come indicato in figura 3.29.

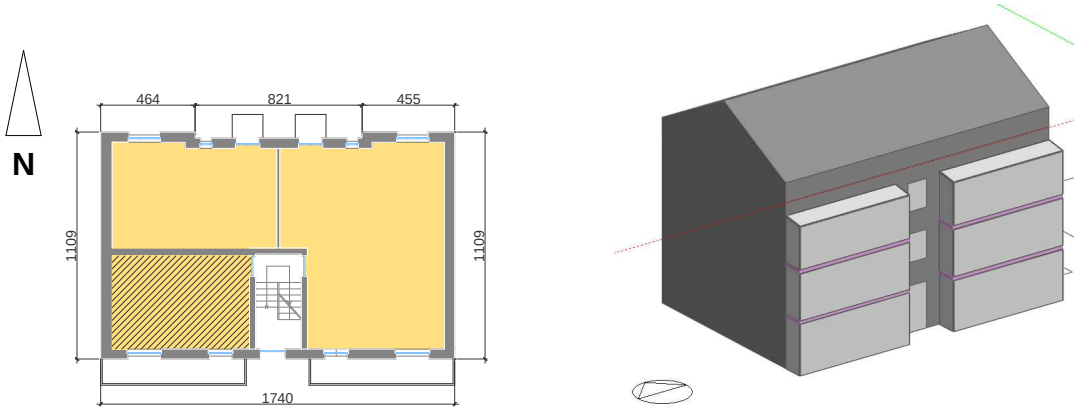



Figura 3.29. Caso di studio: pianta di un piano tipo con indicazione del locale analizzato e modello 3D con indicazione delle serre solari addossate.

La geometria e le caratteristiche dell'edificio sono analoghe a quelle descritte all'interno del paragrafo 1.4. Le 6 serre solari hanno un volume di circa 20 $m^3$ l'una e presentano un sistema vetrato

composto da doppio vetro basso emissivo caratterizzato da una trasmittanza termica $U_g$ pari a 1,6 W/(m$^2$K) e da una trasmittanza solare totale per incidenza normale $g_{gl,n}$ pari a 0,767.

È stato considerato un tasso di ricambio d'aria tra la serra solare e l'ambiente climatizzato pari a 0,3 h$^{-1}$ riferiti all'ambiente climatizzato solo quando $\theta_{serra} \geq \theta_i$. Inoltre, è stato considerato un ricambio d'aria tra l'ambiente esterno e la serra pari a 0,3 h$^{-1}$ mentre pari a 0,2 h$^{-1}$ tra l'ambiente esterno e l'ambiente interno climatizzato. Questo al fine di simulare un sistema di ventilazione naturale tra la serra e l'ambiente interno che ha l'effetto di ridurre ma non eliminare le dispersioni per ventilazione tra l'ambiente interno e l'ambiente esterno (si ipotizza che la serra non possa annullare le infiltrazioni d'aria).

Al fine di confrontare i tre metodi di calcolo sono state analizzate le stesse opzioni per la congruenza dei modelli analizzate al capitolo 1, paragrafo 1.3.

Oltre a quanto descritto nel capitolo sopra citato, al fine di considerare il tasso di ventilazione tra serra e ambiente interno solo qualora $\theta_{serra} \geq \theta_i$ con il metodo mensile quasi stazionario, lo scambio termico per ventilazione con la serra è stato calcolato come

$$Q_{ve} = H_{ve} \cdot \Delta\theta \cdot t \tag{3.29}$$

dove

$\Delta\theta$ è la differenza di temperatura tra ambiente climatizzato e serra solare [°C]. La temperatura della serra solare $\theta_{serra}$ è variabile ora per ora e calcolata attraverso la 3.27

$t$ è il periodo di calcolo [Ms]

$$H_{ve} = \rho_a \cdot c_a \cdot \frac{0,3}{3600} \cdot f_{ve} \cdot V_n \tag{3.30}$$

dove

$\rho_a \cdot c_a$ [J/(m$^3$ K)] è calcolato attraverso *EnergyPlus* secondo quanto descritto all'interno del capitolo 1, paragrafo 1.3

$V_n$ è il volume netto dell'ambiente climatizzato

$$f_{ve} = \frac{t_{vent}}{t_{tot}} \tag{3.31}$$

dove $t_{vent}$ sono le ore di attivazione della ventilazione tra serra e ambiente climatizzato (ricavate dal metodo orario) e $t_{tot}$ sono le ore totali.

In figura 3.30 sono indicati gli andamenti della temperatura all'interno della serra solare per il mese di gennaio e la località di Torino calcolati sia con *EnergyPlus* che con metodo orario semplificato.

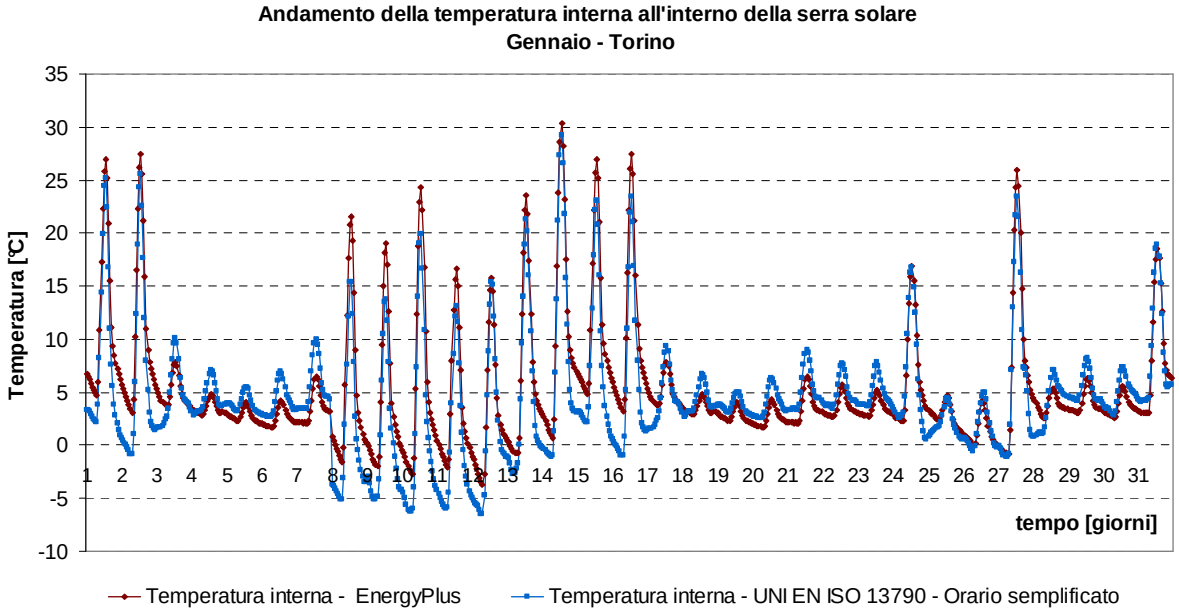



Figura 3.30. Andamento della temperatura all'interno della serra solare calcolata attraverso il modello di EnergyPlus e il metodo orario semplificato della UNI EN ISO 13790.

Lo scostamento percentuale tra i metodi è mediamente del 2% variando dallo 0% al 6,9%. con scostamenti maggiori concentrati durante le ore notturne.

Mediamente il metodo orario semplificato sottostima leggermente la temperatura. Infatti la temperatura media calcolata attraverso la UNI EN ISO 13790 è 4,5°C, variando da -6,5°C a 29,2°C mentre la temperatura media calcolata attraverso *EnergyPlus* è 5,3°C variando da -3,8°C a 30,3°C (figura 3.31).

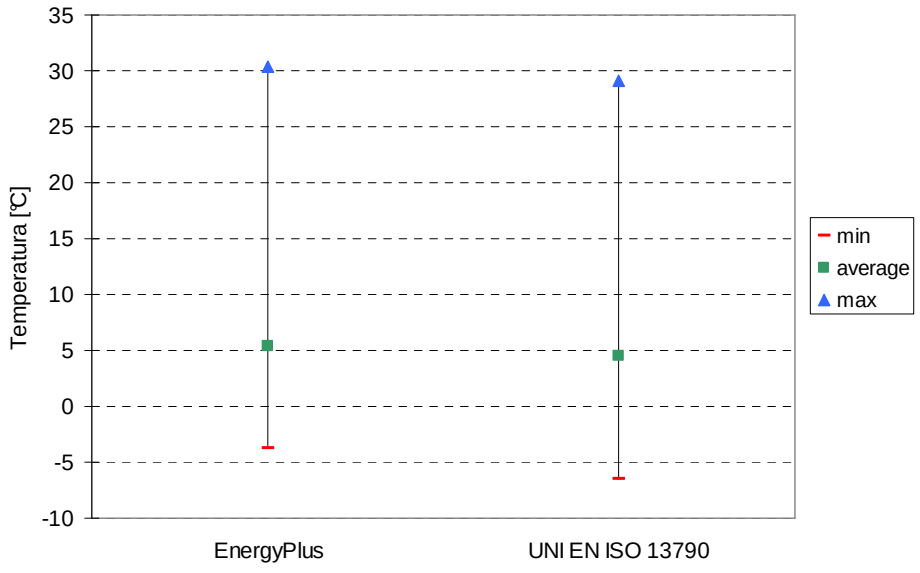



Figura 3.31. Valori minimo, medio e massimo di temperatura all'interno della serra calcolati nel mese di gennaio per Torino.

Si è pertanto proceduto al calcolo del fabbisogno di energia termica del locale adiacente la serra solare secondo i tre metodi sopra descritti sia in assenza di serra solare che in presenza di serra.

Le pareti del locale confinanti con i locali adiacenti si sono considerate adiabatiche.

In figura 3.32 è indicata la riduzione in termini di fabbisogno dovuta all'inserimento della serra solare e calcolata attraverso i tre metodi di calcolo.

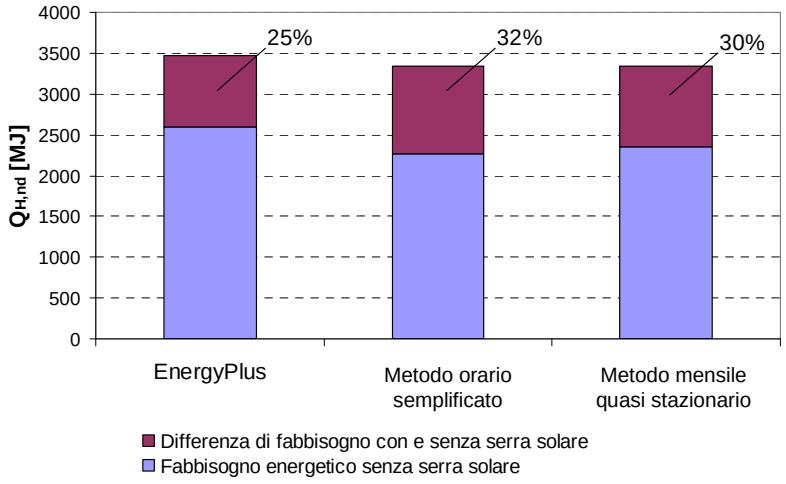



Figura 3.32. Fabbisogno di energia termica con e senza serra solare calcolato attraverso *EnergyPlus* e UNI EN ISO 13790 (orario semplificato e mensile quasi stazionario)

Tabella 3.7. Fabbisogno di energia termica per il mese di gennaio con e senza serra solare calcolato attraverso le tre metodologie.

| | $Q_{H,nd}$ [MJ] senza serra | $Q_{H,nd}$ [MJ] con serra solare | $\Delta Q_{H,nd}$ [MJ] |
|---|---|---|---|
| Energy Plus | 3465 | 2595 | 870 |
| UNI EN ISO 13790 – orario semplificato | 3344 | 2261 | 1083 |
| UNI EN ISO 13790 – mensile quasi stazionario | 3334 | 2345 | 989 |

Come si può notare dalla figura 3.32 e dalla tabella 3.7, nel mese di gennaio la differenza tra i tre metodi in termini di riduzione di fabbisogno di energia termica non è eccessivamente elevata. In particolare i metodi semplificati sovrastimano leggermente la riduzione di fabbisogno di energia termica e questo è dovuto alle ipotesi di calcolo della norma UNI EN ISO 13790, in particolare:

- la quota di energia solare incidente sulle superfici interne della serra ($Q_{si}$) e assorbita in funzione del coefficiente di assorbimento solare $\alpha$ è completamente riemessa all'interno della serra stessa. Non considera pertanto che parte della quota assorbita viene dispersa dai componenti stessi;
- la quota di energia solare entrante all'interno dell'ambiente climatizzato è completamente assorbita. Non viene considerata la quota di energia solare entrante che viene riflessa e riemessa all'esterno attraverso l'involucro trasparente.

La differenza tra i metodi non è in ogni caso elevata anche se aumenta rispetto alla differenza tra metodi per il caso di studio in assenza di serra solare come si può notare in tabella 3.8.

Tabella 3.8. Differenze percentuali tra il fabbisogno di energia termica calcolato per il mese di gennaio con metodi semplificati e metodo dettagliato.

| | **Senza serra solare** | | **Con serra solare** | |
|---|---|---|---|---|
| | **UNI EN ISO 13790 - Orario semplificato** | **UNI EN ISO 13790 - Mensile quasi stazionario** | **UNI EN ISO 13790 - Orario semplificato** | **UNI EN ISO 13790 - Mensile quasi stazionario** |
| Energy Plus | 3,49% | 3,78% | 12,87% | 9,63% |

In figura 3.33 e 3.34 si può invece notare il fabbisogno di energia termica e l'andamento della temperatura interna calcolati per il mese di gennaio e località di Torino rispettivamente attraverso *EnergyPlus* (figura 3.33) e il metodo orario semplificato (figura 3.34). Dalle figure risulta come il fabbisogno di energia termica calcolata attraverso il metodo orario semplificato sia mediamente più basso e poco influenzato dalla ventilazione tra serra solare e ambiente climatizzato. Attraverso *EnergyPlus* invece il fabbisogno è mediamente più elevato e presenta picchi in negativo dove il fabbisogno orario si azzera e la temperatura supera la temperatura di *set-point* di 20°C in corrispondenza delle ore di attivazione della ventilazione naturale tra serra e ambiente climatizzato.

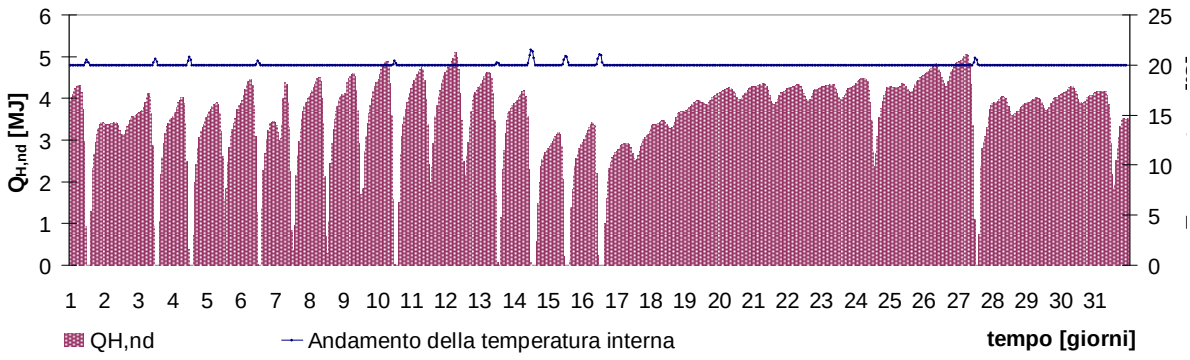



Figura 3.33. Fabbisogno di energia termica e andamento della temperatura interna calcolati attraverso *EnergyPlus* (gennaio – Torino)

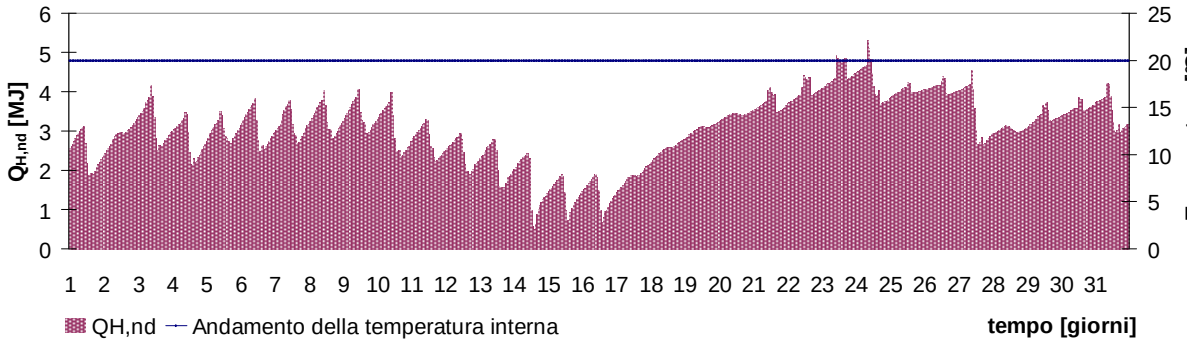



Figura 3.34. Fabbisogno di energia termica e andamento della temperatura interna calcolati attraverso la UNI EN ISO 13790 – metodo orario semplificato (gennaio – Torino)

Si può affermare quanto segue:

- dal confronto tra metodi semplificati (orario semplificato e mensile quasi stazionario) con *EnergyPlus* emerge una differenza in termini di fabbisogno di energia termica per il mese di gennaio di circa il 10% se si considera la presenza di serra solare. Tale differenza risulta pertanto leggermente superiore rispetto alla differenza tra i metodi in assenza di serra solare (circa 3%);
- i metodi di calcolo semplificati sovrastimano gli apporti solari attraverso le serre solari. Il risparmio energetico ottenuto grazie alla presenza della serra solare è di circa il 31% con i metodi semplificati e del 25% attraverso *EnergyPlus*;
- la differenza tra i metodi calcolata in termini di fabbisogno si attenua rispetto alla differenza tra i metodi calcolata in termini di apporti solari;
- non esiste una sostanziale differenza in termini di scostamento percentuale rispetto al metodo dettagliato tra il calcolo orario semplificato e mensile quasi stazionario. Il metodo orario semplificato permette però di ottenere informazioni maggiori ed interessanti relativamente alla serra solare come il profilo di temperatura interna. Inoltre permette la gestione oraria di dispositivi atti a massimizzare il guadagno solare in periodo invernale ed evitare il surriscaldamento in periodo estivo quali l'attivazione della ventilazione tra serra e ambiente climatizzato in funzione della differenza di temperatura tra ambienti, l'attivazione di dispositivi di schermatura solare, di chiusure oscuranti ecc.

Sviluppi futuri del presente lavoro prevedono il confronto in termini di fabbisogno anche per i restanti mesi di riscaldamento e per la stagione di raffrescamento per entrambe le località climatiche.
Durante la stagione di raffrescamento è opportuno prevedere adeguati dispositivi per evitare il surriscaldamento degli ambienti e valutare quanto le metodologie semplificate permettano di tenere adeguatamente in conto di tali sistemi.

# 4. Componenti di involucro speciali: i tetti verdi

Obiettivo generale del presente capitolo è l'individuazione e il calcolo di un parametro termo-fisico rappresentativo della copertura verde.

Con l'entrata in vigore del D.P.R. 59/2009, si prescrive, al fine di garantire una adeguata inerzia termica del componente di involucro opaco, il rispetto della trasmittanza termica periodica ($Y_{ie}$) limite. Tale parametro, calcolato attraverso la norma UNI EN ISO 13786 per componenti tradizionali di involucro, non tiene adeguatamente in considerazione i fenomeni complessi relativi a tecnologie di involucro speciali quali coperture verdi.

Lo studio si è quindi rivolto all'individuazione di un metodo per il calcolo di un parametro termo-fisico rappresentativo ($Y_{ie}$) di tali tecnologie a partire dalla metodologia di calcolo dei flussi termici attraverso coperture verdi implementato in *EnergyPlus*.

Un'analisi di sensibilità al variare di alcune proprietà degli strati costituenti la copertura verde ha permesso di individuare i parametri la cui variazione incide maggiormente sulla trasmittanza termica periodica.

Infine si è effettuato un confronto tra i valori di $Y_{ie}$ calcolati attraverso il metodo di calcolo complesso individuato e i valori di $Y_{ie}$ calcolati attraverso il metodo semplificato riportato nella norma UNI EN ISO 13786.

## 4.1 Il fenomeno fisico e la definizione delle tipologie di tetti verdi

La copertura verde è una tecnologia edilizia che consiste nell'installazione di uno strato di vegetazione al di sopra della copertura tradizionale.

La norma UNI 11235, 2007 - *Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde*, prevede l'utilizzo di tale tecnologia per il controllo di condizioni ambientali sia interne che esterne.

In riferimento alle condizioni interne, la copertura verde può svolgere ruolo di isolante acustico, in funzione del peso degli strati soprastanti e, grazie alla sua inerzia termica, può smorzare e sfasare il flusso di calore entrante nell'ambiente interno limitando le oscillazioni termiche e quindi il surriscaldamento ambientale.

In riferimento al controllo di condizioni ambientali esterne, la copertura verde, in funzione della massa fogliare e della gestione dell'irrigazione, può svolgere ruolo captante delle polveri contenute nell'aria; può mitigare la temperatura dell'aria circostante grazie al processo di evapotraspirazione e alla riduzione della quota riflessa di radiazione solare; può ridurre il fenomeno della riflessione dell'onda sonora e quindi migliorare il comfort acustico urbano; può assorbire parte dell'afflusso di acque meteoriche e quindi evitare rallentamenti nei sistemi di raccolta.

Esistono diverse tipologie di copertura verde:

- di tipo estensivo;
- di tipo semi-intensivo;

- di tipo intensivo.

La copertura di tipo estensivo è caratterizzata dall'utilizzo di essenze di ridotte dimensioni e che non necessitano di elevati spessori di terreno né di una assidua manodopera perché in grado di resistere a elevate escursioni termiche, elevati livelli di irraggiamento, vento ecc. Sono principalmente utilizzate piante grasse quali *Sedum*, *Sempervivum*, *Saxifraga*, *Dianthus*, *Asteraceae* o erbe ornamentali.

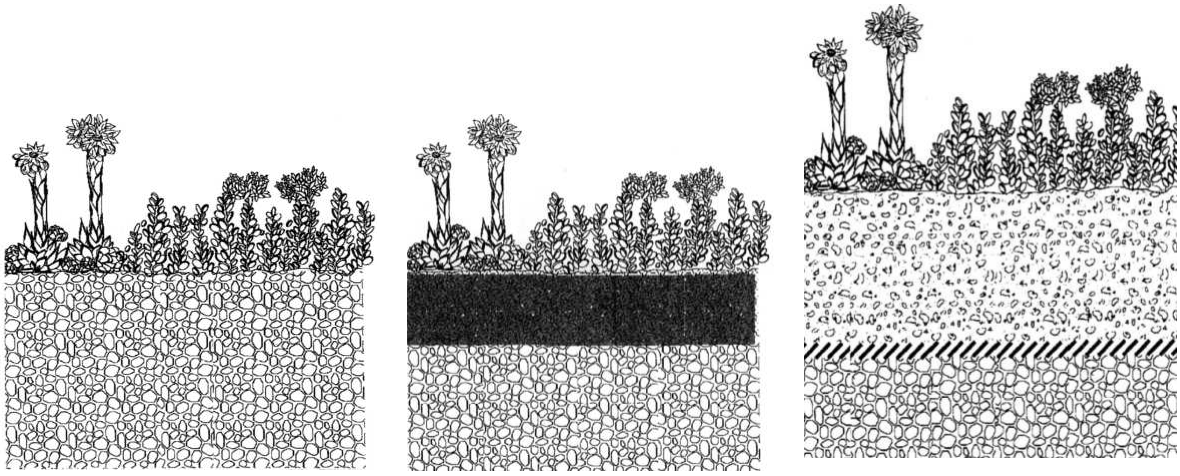
Il tetto verde semi-intensivo è caratterizzato dalla presenza di tipologie vegetali che necessitano di una manutenzione più assidua. Inoltre necessitano di uno strato di terreno di spessore maggiore e di irrigazione periodica. Le tipologie vegetali che possono essere installate sono diverse specie di sempreverdi, di graminacee e di arbusti.

Il tetto verde intensivo o tetto giardino è la tipologia che richiede maggiori costi di installazione e maggiore manutenzione in quanto le specie vegetali, che consistono anche in alberi ad alto fusto, richiedono opere costanti di irrigazione e potatura. Lo strato di terreno può raggiungere lo spessore di 50 cm.

Normalmente un inverdimento pensile è realizzato mediante l'impiego di diversi strati, ciascuno dei quali assolve ad una specifica funzione. La UNI 11235 fornisce l'elenco degli strati funzionali che più comunemente costituiscono la copertura verde.

In particolare tre sono gli strati indispensabili: il substrato o strato di coltura, lo strato filtrante e lo strato drenante.

A seconda che questi strati siano realizzati con un unico o più materiali, si possono distinguere i tre seguenti sistemi: sistema monostrato, sistema a due strati, sistemi a tra strati (Figura 4.1).



a) Sistema monostrato b) Sistema a due strati c) Sistema a tra strati

Figura 4.1. Tipologie di coperture verdi

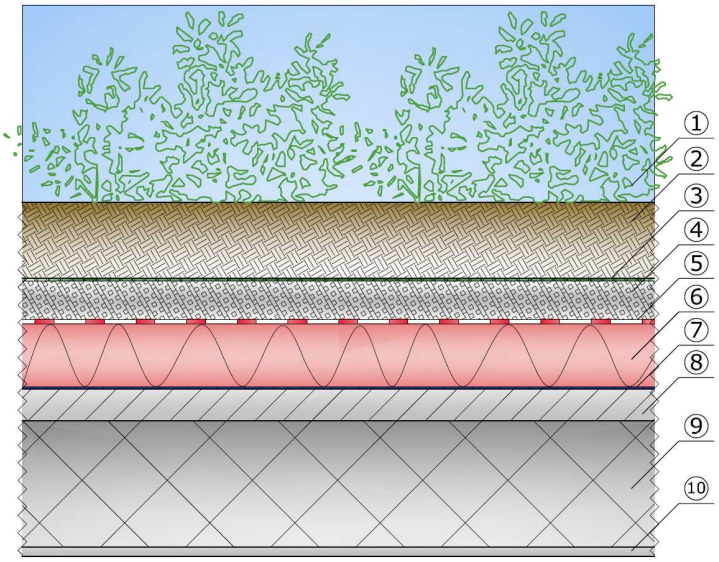
Nei sistemi monostrato il materiale impiegato svolge contemporaneamente la funzione di substrato, filtro e strato drenante. I materiali più adatti a questo scopo sono il lapillo vulcanico, l'argilla espansa e l'ardesia espansa (Figura 4.1, a). Il sistema a due strati è caratterizzato dalla presenza di strato di coltura e strato drenante, manca pertanto lo strato filtrante che può talvolta essere svolto da uno strato di humus (Figura 4.1, b).

Il sistema a tre strati è il più diffuso ed efficace sistema di inverdimento. Lo strato di coltura, lo strato filtrante e lo strato drenante sono nettamente distinti: ciò permette di realizzare numerose combinazioni di materiali idonei per il substrato, il filtraggio e il drenaggio. Con il sistema a tre strati è possibile realizzare sia inverdimenti estensivi sia intensivi. I materiali impiegati per il drenaggio sono di diversa tipologia e sono scelti in base alle specifiche esigenze di progetto ed al tipo di vegetazione da utilizzare. Lo strato filtrante consente di mantenere costanti nel tempo le proprietà dello strato drenante, assicura una buona aerazione del substrato e fa in modo che la granulometria di quest'ultimo rimanga invariata trattenendo le particelle più fini e le sostanze organiche.

Le coperture verdi possono essere installate al di sopra di una copertura tradizionale. Tale copertura può essere caratterizzata da diverse disposizioni di strati funzionali e distinta pertanto in:

- tetto non ventilato (tetto "caldo");
- tetto ventilato;
- tetto rovescio.

Nel tetto non ventilato, o tetto caldo (Figura 4.2) lo strato di isolamento termico è posizionato sotto l'impermeabilizzazione. Il tetto caldo deve essere provvisto di una barriera al vapore tra la soletta portante e l'isolante. Deve tenersi in considerazione la resistenza a compressione dell'isolante che dovrà essere sufficiente a sostenere tutti gli strati funzionali. Si potranno inserire diverse tipologie di copertura verde: estensive, semi – intensive, intensive.

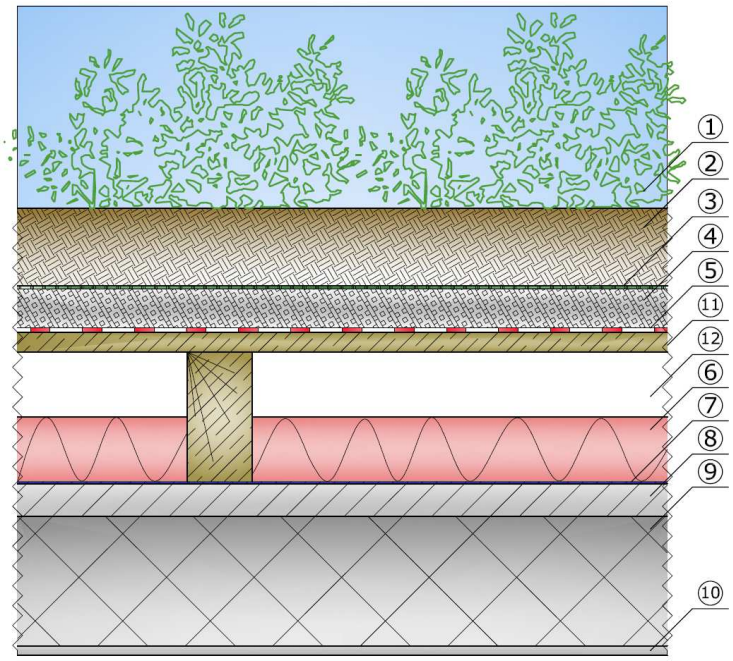



Legenda:

1. Vegetazione
2. Terreno
3. Geotessile
4. Strato drenante
5. Strato impermeabile
6. Isolante termico
7. Barriera al vapore
8. Massetto di pendenza
9. Solaio in laterocemento
10. Intonaco

Figura 4.2. Stratigrafia di copertura verde non ventilata

Nella copertura ventilata (figura 4.3) lo strato isolante si trova sotto l'impermeabilizzazione ma separato da essa tramite intercapedine ventilata. Le capacità di carico di tale struttura sono limitate, pertanto permette l'installazione di tipologie di verde caratterizzate da un peso moderato. Si potranno adottare tipologie di tetto verde estensive.

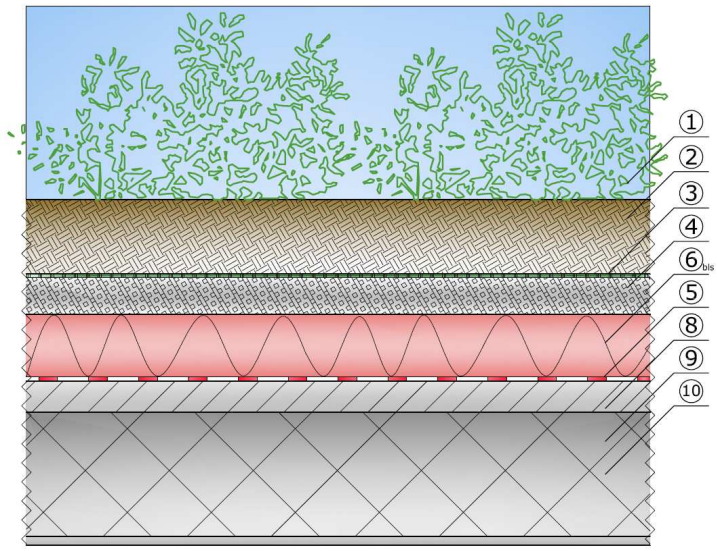



Legenda:

1. Vegetazione
2. Terreno
3. Geotessile
4. Strato drenante
5. Strato impermeabile
6. Isolante termico
7. Barriera al vapore
8. Massetto di pendenza
9. Solaio in laterocemento
10. Intonaco
11. Assito
12. Camera d'aria

Figura 4.3. Stratigrafia di copertura verde ventilata

Nel tetto rovescio (figura 4.4) lo strato di isolamento si trova sopra l'impermeabilizzazione. Gli strati funzionali relativi al tetto verde non dovranno pertanto impedire il processo di diffusione del vapore dallo strato isolante. Solo un limitato numero di materiali si adatta a questo tipo di utilizzo che implica la messa in opera dell'isolante in un ambiente molto umido, a contatto con acqua liquida proveniente dal sovrastante strato di drenaggio.




Legenda:

1. Vegetazione
2. Terreno
3. Geotessile
4. Strato drenante
5. Strato impermeabile
6. Isolante termico
8. Massetto di pendenza
9. Solaio in laterocemento
10. Intonaco

Figura 4.4. Stratigrafia di tetto verde rovescio

Gli strati funzionali di una copertura verde sono elencati di seguito:

- ***strato di impermeabilizzazione:*** conferisce alla copertura impermeabilità all'acqua meteorica e di irrigazione. Deve resistere oltre a sollecitazioni meccaniche, fisiche e chimiche indotte dall'ambiente esterno anche a deformazioni del supporto e a eventuali sbalzi termici. Vi sono sostanzialmente due

tipologie di manti prefabbricati che sono maggiormente utilizzati: membrane bitume-polimero e guaine sintetiche. Questo strato può essere trattato al fine di resistere all'azione delle radici; nel caso in cui non sia stato trattato adeguatamente dovrà essere predisposto anche lo strato seguente.

- ***Barriera alle radici:*** protegge dal possibile danneggiamento da parte delle radici. Questo strato dovrà essere installato quando lo strato di impermeabilizzazione non sia resistente all'azione delle radici.

- ***Strato di protezione:*** è uno strato progettato appositamente in rapporto allo spessore e alle caratteristiche dello strato drenante ed evita che questo danneggi meccanicamente nella fase di installazione lo strato di barriera alle radici. Questo strato può anche svolgere la funzione di trattenere l'acqua e le sostanze nutritive per le piante.

- ***Strato di drenaggio:*** permette all'acqua in eccesso di raggiungere i canali di scolo. In funzione del progetto e del materiale utilizzato, lo strato di drenaggio può avere funzioni aggiuntive come zona per l'immagazzinamento dell'acqua, come ampliamento della zona adibita alla crescita delle radici, come strato di aerazione del sistema, come protezione di tutto ciò che si trova al di sotto di esso. Questo strato è realizzato da materiali leggeri: spesso si utilizzano elementi di gomma o plastica. Altri materiali utilizzati sono la ghiaia, la pomice, l'argilla espansa o i cocci di argilla.

- ***Strato di filtraggio:*** separa le piante e il substrato di coltura dallo strato di drenaggio. Specialmente le particelle piccole, l'humus e le sostanze organiche sono trattenute dallo strato di filtraggio e di conseguenza sono rese disponibili per il sostentamento delle piante. In aggiunta, esso permette che lo strato di drenaggio e i canali di scolo dell'acqua in eccesso non siano ostruiti dal deposito di limo. Questo strato è preferibilmente costituito da un geo-tessuto.

- ***Substrato o strato di coltura:*** questo strato è alla base del tetto verde. Deve essere garantita una sufficiente profondità per lo sviluppo delle radici, un corretto apporto di sostanze nutritive che permettano lo sviluppo della vegetazione ed anche un rapporto aria-acqua bilanciato. Questo strato è direttamente dipendente dalle caratteristiche del tetto verde che si vuole realizzare e dai requisiti a base di progetto. I principali criteri del sistema substrato che devono essere presi in considerazione sono: granulometria, proporzione di materiale organico, resistenza al gelo, stabilità strutturale, resistenza all'erosine da parte del vento, permeabilità all'acqua, massima capacità di trattenere acqua al suo interno, contenuti nutritivi, aerazione e valore del pH. Importante è che sia resa minima la presenza di erbe infestanti. Anche questo strato, assieme a quello di drenaggio, permette il corretto deflusso delle acque in eccesso. È preferibile impiegare materiali minerali leggeri, caratterizzati da una grande capacità di ritenuta dell'acqua e da una buona permeabilità, come lava, pomice, argilla espansa, ed altri materiali similari. A questi materiali minerali poi deve essere aggiunto del materiale organico.

- ***Piante:*** per ottenere un buon attecchimento e una lunga durata della vegetazione è necessario valutare attentamente le condizioni locali dell'ambiente. Devono essere fatte considerazioni aggiuntive su esposizione al vento, inquinamento dell'aria, variazioni di temperatura così come

esposizione alla radiazione solare e umidità. Sono necessari tre stadi di manutenzione delle piante: durante l'installazione, durante lo sviluppo, e di mantenimento. A seconda del tipo di tetto verde, estensivo o intensivo, la manutenzione sarà più o meno intensa.

## 4.2 Incentivi all'utilizzo di coperture verdi: la legislazione vigente

La legislazione vigente in materia di risparmio energetico fornisce chiari spunti progettuali che incentivano l'utilizzo di coperture verdi al fine di contenere le oscillazioni di temperatura in ambiente confinato.

A livello nazionale, il D.P.R. 59/2009 in attuazione del D. Lgs. 311/06, prescrive che l'involucro edilizio, ad esclusione di quanto indicato all'interno della tabella 4.1, sia caratterizzato da valori minimi di massa superficiale o, in alternativa, da valori minimi di trasmittanza termica periodica $Y_{ie}$. In alternativa, è possibile *l'utilizzo di tecniche e materiali, anche innovativi, ovvero coperture a verde* al fine di raggiungere lo stesso livello di inerzia termica. *In tale caso deve essere prodotta una adeguata documentazione e certificazione delle tecnologie e dei materiali che ne attesti l'equivalenza con le predette disposizioni.*

Tabella 4.1. Schema semplificativo delle disposizioni legislative in riferimento all'utilizzo di coperture verdi.

| | |
|---|---|
| Riferimento legislativo | DPR 59/2009: Attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192 come modificato dal decreto legislativo n. 311/06 |
| Ambito di applicazione | • Edifici di nuova costruzione<br>• Ristrutturazione integrale dell'involucro di edifici esistenti<br>• Demolizione e ricostruzione in manutenzione straordinaria di edifici esistenti<br>• Ampliamento superiore al 20 % in volumetria dell'intero edificio esistente |
| Esclusioni | • Edifici adibiti ad attività commerciali, sportive, scolastiche, industriali e artigianali<br>• Zona climatica F<br>• Località in cui l'irradianza media mensile sul piano orizzontale nel mese di massima insolazione sia minore di 290 W/m$^2$ |
| Espressione del requisito | • Massa superficiale superiore a 230 kg/m$^2$ (pareti opache verticali con l'eccezione di quelle comprese nel quadrante nord-ovest /nord/nord-est)<br>oppure<br>• Modulo della trasmittanza termica periodica inferiore a 0,12 W/m$^2$K (pareti opache verticali con l'eccezione di quelle nel quadrante nord-ovest/nord/ nord-est) e inferiore a 0,20 W/m$^2$K (pareti opache orizzontali o inclinate)<br>oppure<br>*Utilizzo alternativo di tecniche e materiali, anche innovativi, ovvero coperture a verde, che permettano in modo equivalente di contenere le oscillazioni della temperatura degli ambienti in funzione dell'andamento dell'irraggiamento solare.* |

L'utilizzo di coperture verdi al fine di ridurre le oscillazioni termiche in ambiente confinato è anche incentivato all'interno dell'Allegato energetico – ambientale al regolamento edilizio della città di Torino.

In questo caso si tratta di un stimolo alla progettazione di coperture verdi incentivato attraverso uno sconto sugli oneri di urbanizzazione.

L'Allegato energetico – ambientale specifica che *ai fini dell'ottenimento degli incentivi inerenti la trasmittanza e l'inerzia termica, la verifica delle stesse dovrà essere eseguita senza tenere conto della presenza degli strati connessi alla copertura a verde (elementi drenanti, elementi di accumulo idrico, strato colturale e strato di vegetazione) e considerando la temperatura esterna di progetto.*
Il calcolo della prestazione della copertura verde si intende pertanto effettuato attraverso la normativa tecnica vigente per elementi di involucro tradizionali, ovvero la norma UNI EN ISO 6946 e la norma UNI EN ISO 13786.

## 4.3 Analisi dei modelli di calcolo semplificati

Allo stato attuale non esiste un modello di calcolo adottato univocamente per calcolare il flusso termico trasmesso attraverso una copertura verde. I parametri atti a definirne le prestazioni termiche vengono pertanto calcolati attraverso le norme di riferimento per i componenti di involucro tradizionali.
La trasmittanza termica stazionaria viene pertanto calcolata secondo la UNI EN ISO 6946 e i parametri termici dinamici secondo la UNI EN ISO 13786. Nel presente paragrafo viene analizzata la metodologia per il calcolo dei parametri termici dinamici secondo la UNI EN ISO 13786.

### *4.3.1. La normativa tecnica di settore – UNI EN ISO 13786*

La norma UNI EN ISO 13786 permette il calcolo dei parametri termici dinamici a partire dal flusso termico conduttivo attraverso il metodo delle ammettenze introdotto da N.O. Milbank e J. Harrington-Lynn (Milbank e Harrington-Lynn, 1974).
In particolare il metodo valuta le temperature e i rispettivi flussi termici derivanti da condizioni al contorno periodiche, di tipo sinusoidale.
In particolare, la norma propone un modello di calcolo basato sull'ipotesi che la sollecitazione termica (esterna e interna) sia di tipo sinusoidale dove per "andamento sinusoidale" si intende una variazione temporale attorno ai rispettivi valori medi della temperatura e di flusso termico rappresentata dalla funzione seno.

*Il calcolo della trasmittanza termica periodica*

I parametri termici dinamici dei componenti sono quelle caratteristiche che ne descrivono il comportamento termico quando il componente è sottoposto ad una sollecitazione termica variabile. Se le sollecitazioni termiche sono di tipo sinusoidale, esse producono sul lato direttamente interessato dalla sollecitazione e sul suo opposto, un effetto anch'esso di tipo sinusoidale.

Si definisce ammettenza come *l'ampiezza complessa* $\hat{\Phi}_m$ *della densità di flusso termico* (positivo quando diretto verso la superficie del componente) *attraverso la superficie del componente adiacente alla zona m, diviso per l'ampiezza complessa* $\hat{\theta}_n$ *della temperatura nella zona n.*

$$Y_{mn} = -\frac{\hat{\Phi}_m}{\hat{\theta}_n} = \frac{L_{mn}}{A} \tag{4.1}$$

dove

$A$ è l'area frontale della superficie attraversata dal flusso termico [m$^2$];

$L_{mn}$ è la conduttanza termica periodica [W/K] ossia un numero complesso che correla il flusso termico periodico in un componente, con le temperature periodiche su entrambi i lati del componente stesso in condizioni sinusoidali

$$\hat{\Phi}_m = L_{mm}\hat{\theta}_m - L_{mn}\hat{\theta}_n \tag{4.2}$$

$L_{mm}$ relaziona il flusso termico periodico sul lato *m* del componente alla temperatura periodica sul lato *m*, quando l'ampiezza della temperatura sul lato *n* è pari a zero. Si ricava inoltre che la conduttanza termica periodica $L_{mn}$ è pari a

$$L_{mn} = AY_{mn} \tag{4.3}$$

Se si analizza il comportamento dinamico di un solo lato del componente edilizio in esame, i parametri $Y_{mm}$ e $Y_{nn}$ (con m $\neq$ n) prendono il nome di ammettenze termiche; se si analizza il comportamento dinamico del componente su entrambi i lati i parametri $Y_{mn}$ e $Y_{nm}$ prendono il nome di trasmittanze termiche periodiche. La trasmittanza termica periodica è il parametro più corretto per valutare il contenimento delle oscillazioni della temperatura ambiente in funzione dell'andamento dell'irraggiamento solare incidente sul componente.

## 4.4 Analisi dei modelli di calcolo dettagliati

### *4.4.1 Gli studi di ricerca a livello nazionale e internazionale*

Molteplici sono gli studi a livello internazionale che si sono occupati di individuare una metodologia per la caratterizzazione energetica di coperture verdi.

Palomo del Barrio (1998) individua una metodologia complessa per il calcolo della trasmissione di calore attraverso coperture verdi che prende in considerazione gli scambi termici radiativi alle alte e alle basse lunghezze d'onda, gli scambi termici convettivi tra lo strato di terreno e la vegetazione, l'evapotraspirazione della vegetazione e il calore latente dell'acqua presente all'interno del terreno. Attraverso un'analisi di sensibilità condotta a partire dal modello di calcolo descritto, emerge che i parametri più importanti sono l'indice di area fogliare (cifra paragrafo 4.4.2), la densità del terreno, lo spessore del terreno e il contenuto di umidità del terreno.

Al fine di verificare l'efficienza di coperture verdi in periodo estivo e invernale, Eumorfopoulou e Aravantinos (1997) calcolano la trasmittanza termica con un metodo stazionario e concludono che generalmente le coperture verdi possono essere utilizzate anche ai fini dell'isolamento termico invernale ma non possono sostituire lo strato di isolante termico.

Alcune simulazioni sul comportamento energetico delle coperture verdi sono condotte da Wong et al. (2003) attraverso il codice di simulazione dinamica DOE-2 al variare delle tipologie di vegetazione e di terreno. I risultati dimostrano che le coperture verdi permettono di ridurre il fabbisogno di energia

termica di edifici commerciali localizzati a Singapore di percentuali variabili tra lo 0,6 e il 14,5%. Inoltre i risultati dimostrano che aumentando gli spessori di terreno migliorano le prestazioni energetiche annuali.

Da un'analisi di sensibilità (Theodosiou, 2003) condotta attraverso l'impiego della metodologia di calcolo di Palomo del Barrio descritta precedentemente all'interno di un codice di simulazione dinamico, si conclude che il parametro maggiormente influente sulla prestazione energetica della copertura verde è il già citato indice di area fogliare, insieme alla tipologia di terreno considerato.

Lo stesso metodo è implementato all'interno del codice Matlab e validato attraverso dati sperimentali di una copertura collocata in India (Kumar e Kaushik, 2005), mostrando di ottenere errori molto bassi (3,3% di scostamento sulle temperature superficiali della copertura verde; 6,1% di scostamento della temperatura dell'ambiente interno). Da un'analisi di sensibilità svolta, l'indice di area fogliare rimane il parametro che influenza di più le prestazioni della copertura.

Un ulteriore metodo di calcolo è sviluppato da Sailor (2008). Tale metodologia, successivamente implementata all'interno del codice di simulazione *EnergyPlus* è descritta all'interno del paragrafo 4.4.2.

Feng et al. (2010), attraverso la definizione di una metodologia di calcolo piuttosto complessa, suddividono i diversi contributi allo scambio termico totale attraverso una copertura verde dovuti a evapotraspirazione (58,4%); scambio radiativo alle alte lunghezze d'onda tra la vegetazione e l'atmosfera (30,9%); fotosintesi delle piante (9,5%).

Molti studi scientifici hanno invece come obiettivo la valutazione del comportamento delle coperture verdi e l'individuazione delle proprietà del terreno e della vegetazione attraverso monitoraggi sul campo.

A tale scopo Niachou et al. (2001) monitorano temperature superficiali di una copertura priva di isolamento termico con e senza copertura verde rilevando mediamente una riduzione di 10 °C (da 42 ÷ 48 °C senza copertura verde a 28 ÷ 40 °C con copertura verde). Inoltre, i risultati del monitoraggio della temperatura ambiente nel periodo estivo (3-6 e 10-13 luglio) indicano una riduzione media di temperatura dell'aria interna pari a 2°C. Oltre ai monitoraggi, alcune simulazioni numeriche in regime dinamico sono condotte al fine di quantificare i benefici in termini di riduzione del fabbisogno di energia annuale. Tale riduzione è tanto più elevata quanto più l'edificio è poco isolato: la riduzione è dell'ordine del 4% ÷ 7% in presenza di ventilazione notturna per edifici moderatamente isolati e di circa il 2% per edifici molto ben isolati.

Al fine di indagare i benefici in termini di mitigazione degli effetti di isola di calore urbana indotti dall'utilizzo di coperture verdi, Nyuk et al. (2003) e Takebayashi e Moriyama (2007) si occupano di monitorare la temperatura superficiale di alcune tipologia di coperture verdi.

Al fine di indagare il fenomeno dell'evapotraspirazione Lazzarin et al. (2005) svolgono una campagna di sperimentazione durante il periodo estivo e una durante il periodo invernale. Dai risultati dei monitoraggi emerge l'importanza del fenomeno dell'evapotraspirazione: in particolare,

quando il terreno ha un elevato contenuto di umidità, il flusso termico complessivo può risultare uscente (dall'ambiente interno all'esterno) e quindi la copertura può funzionare come un sistema di raffrescamento passivo.

Per sopperire all'assenza di informazioni riguardanti le proprietà termiche di terreni utilizzati per coperture verdi, Sailor et al. (2008) svolgono monitoraggi su alcune tipologie di terreno al variare della percentuale di umidità presente all'interno. Di tali monitoraggi si discute all'interno del sottoparagrafo 4.5.2.

### *4.4.2 Modello di calcolo implementato dal software EnergyPlus*

Il modello di calcolo implementato nel codice di simulazione dinamica *EnergyPlus* è il modello FASST (Fast All-season Soil STrength) sviluppato da Susan Frankenstein e George G. Koenig nel settembre 2004 per il corpo militare ingegneri degli USA, Washington.

A sua volta, il modello di calcolo deriva da due metodi per la modellazione atmosferica:

- Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS) di R.E. Dickinson, A. Henderson-Sellars, P.J. Kennedy;
- Simple Biosphere model (SiB) di P.J. Sellers, Y. Mintz, Y.C. Sud, A. Dalcher.

All'interno di *EnergyPlus*, il modulo per il calcolo degli scambi termici che interessano la copertura verde, prende in considerazione lo strato di terreno e lo strato di vegetazione soprastante. Entrambi gli strati sono definiti attraverso determinate proprietà che influenzano lo scambio termico stesso. Al fine di calcolare lo scambio termico totale attraverso un componente tecnico costituito da uno strato di terreno e di vegetazione poggiati su un supporto, il modulo per il calcolo del tetto verde viene "accoppiato" con il modulo *Surface heat balance method*. Si fa presente che ad ora il calcolo dello scambio di calore di tipo conduttivo attraverso la copertura verde viene effettuato esclusivamente attraverso il calcolo alle funzioni di trasferimento, non essendo ancora stato implementato il calcolo alle differenze finite.

Il modello di calcolo permette di valutare e calcolare gli scambi termici che interessano lo strato di coltura e lo strato di vegetazione, tenendo in considerazione:

- gli scambi termici radiativi alle alte lunghezze d'onda che interessano il manto di vegetazione;
- gli scambi termici radiativi alle basse lunghezze d'onda che interessano il manto di vegetazione;
- l'influenza del manto di vegetazione sugli scambi termici convettivi;
- l'effetto dell'evapotraspirazione;
- gli scambi termici e l'accumulo termico dello strato di coltura;
- l'effetto dell'umidità sulle caratteristiche termiche dei materiali.

Vengono risolte simultaneamente due equazioni di bilancio termico di cui una sulla superficie fogliare e una sulla superficie dello strato di coltura al fine di ricavare rispettivamente la temperatura

superficiale del terreno ($T_g$) e la temperatura superficiale del manto di vegetazione ($T_f$) dalle quali, per mezzo di procedura iterativa, ricavare il flusso che attraversa l'elemento tecnico.

I dati di ingresso per il calcolo sono, per quanto concerne lo strato fogliare:

- l'altezza delle piante [m]. Il valore è compreso tra 0,01 e 1 m;
- l'indice di area fogliare (LAI) [-]. Questo parametro indica la proiezione dell'area della foglia sul piano orizzontale per unità di superficie del terreno. Il valore è compreso tra 0,001 e 5;
- il coefficiente di riflessione delle foglie [-];
- l'emissività delle foglie [-];
- la resistenza stomatica minima [s/m]. Questo parametro indica la resistenza alla diffusione del vapore d'acqua attraverso gli stomi della pianta. Piante caratterizzate da un basso valore di resistenza stomatica sono caratterizzate da processi di evapotraspirazione maggiori rispetto a piante con resistenza stomatica inferiore. I valori sono generalmente compresi tra 50 e 300 s/m.

Per quanto riguarda lo strato di coltura i dati di ingresso per il calcolo sono:

- la rugosità. È possibile classificare in maniera semplificata un terreno come "molto rugoso", "rugoso", "mediamente rugoso", "mediamente liscio", "liscio" e "molto liscio". Tale parametro influenza lo scambio termico per convezione.
- lo spessore del terreno [m];
- la conducibilità termica del terreno asciutto [W/(m·K)];
- la densità del terreno asciutto [kg/m$^3$];
- il calore specifico del terreno asciutto [J/(kg·K)];
- il coefficiente di assorbimento solare [-];
- il contenuto di umidità a saturazione nel terreno [-]. Il valore è compreso tra 0,1 e 1 e tipicamente è 0,5;
- il contenuto residuo di umidità nel terreno [-]. Il valore è compreso tra 0,01 e 0,1;
- il contenuto iniziale di umidità nel terreno [-]. Il valore è compreso tra 0,1 e 1.

Nel seguito viene descritto il modello di calcolo che è pure schematizzato in figura 4.5.

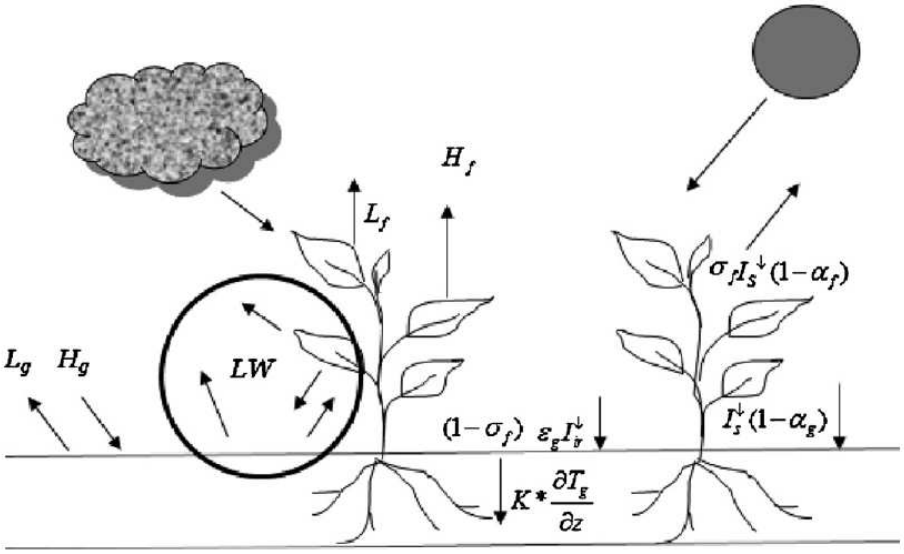



Figura 4.5. Schema degli scambi termici considerati all'interno del modello di calcolo. Fonte: *EnergyPlus* User Guide.

<u>*Equazione di bilancio: vegetazione*</u>

L'equazione di bilancio a livello dello strato di vegetazione è data da

$$F_f = \sigma_f \left[ I_s (1-\alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir} - \varepsilon_f \sigma T_f^4 \right] + \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} \left( T_g^4 - T_f^4 \right) + H_f + L_f = 0 \tag{4.4}$$

dove $H_f$ [W/m$^2$] è il flusso areico di calore sensibile diretto verso l'ambiente esterno, $L_f$ [W/m$^2$] è il flusso areico di calore latente verso l'ambiente esterno mentre il resto dell'equazione fornisce il contributo degli scambi termici radiativi alle alte e alle basse lunghezze d'onda (compresi gli scambi radiativi reciproci tra il manto di vegetazione e lo strato di coltura).

Nel seguito sono sviluppate in dettaglio le metodologie per il calcolo dei singoli contributi dell'equazione di bilancio a livello della vegetazione.

*Scambi termici radiativi*

Gli scambi termici radiativi sono pari a

$$\sigma_f \left[ I_s (1-\alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir} - \varepsilon_f \sigma T_f^4 \right] + \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} \left( T_g^4 - T_f^4 \right) \tag{4.5}$$

dove

$\sigma_f$ è la percentuale di copertura della vegetazione che equivale al rapporto tra la superficie ombreggiata di terreno e la superficie totale di terreno. Tale parametro risulta dipendente dal LAI, precedentemente definito, secondo le equazioni seguenti

$$\sigma_f = 1 - \exp(-0{,}75 LAI) \tag{4.6}$$

per l'erba

$$\sigma_f \begin{cases} \sigma_{f,max} \rightarrow T_g > 298 \\ \sigma_{f,min} \rightarrow T_g < 273{,}15 \\ \sigma_{f,max} - [1 - F(T_g)][\sigma_{f,max} - \sigma_{f,min}] \rightarrow 273{,}15 \leq T_g \leq 298 \end{cases} \tag{4.7}$$

per altro tipo di vegetazione

L'indice di area fogliare (*LAI*) [-] è dato dalla seguente equazione

$$LAI = LAI_{min} + F(T_g)[LAI_{max} - LAI_{min}] \tag{4.8}$$

dove $F(T_g)$ è dato dalla (4.9)

$$F(T_g) = 1 - 0{,}0016[298 - T_g]^2 \tag{4.9}$$

$T_g$ è la temperatura del terreno [°C]. I valori di $\sigma_{f,max}$, $\sigma_{f,min}$, $LAI_{max}$, $LAI_{min}$ sono forniti dalla tabella 4.2 per alcune tipologie di specie arboree.

Tabella 4.2: proprietà di alcune tipologie di vegetazione

$I_S$ è l'irradianza solare totale incidente sulla copertura [W/m$^2$]

$\alpha_f$ è il coefficiente di riflessione della vegetazione [-]. Valori di (1-$\alpha_f$) sono forniti in tabella 4.3.

Tabella 4.3. Caratteristiche della vegetazione

| Variabile | Valore basso | Valore medio | Valore alto |
|---|---|---|---|
| $(1-\alpha_f)_{min}$ | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| $(1-\alpha_f)_{max}$ | 0,85 | 0,85 | 0,85 |
| $Z_{f,min}$ (cm) | 5 | 35 | 85 |
| $Z_{f,max}$ (cm) | 50 | 60 | 85 |
| $r_{s,max}$ (s/m) | 500 | 500 | 500 |

$\varepsilon_f$ è l'emissività della vegetazione [-]. Alle alte lunghezze d'onda $\varepsilon_f$ è assunta pari al suo coefficiente di assorbimento ed è un valore che varia linearmente da 0,9 a 0,96 in funzione della temperatura superficiale della vegetazione secondo la seguente equazione

$$\varepsilon_f = 0{,}9 + F(T_g) \tag{4.10}$$

dove $F(T_g)$ è dato dall'equazione (4.9).

$I_r$ è la radiazione infrarossa [W/m$^2$]

$\sigma$ è la costante di Stefan-Boltzman (5.699×10–8 W/(m$^2$·K$^4$))

$T_f$ è la temperatura superficiale della vegetazione [°C]

$\varepsilon_g$ è l'emissività del terreno [-]. Alcuni valori sono forniti in tabella 4.4.

$\varepsilon_1$ è pari a

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_f + \varepsilon_g - \varepsilon_f \varepsilon_g \tag{4.11}$$

Tabella 4.4. Caratteristiche di alcune tipologie di terreno

| Tipologia di terreno | Densità del terreno asciutto $\gamma_d$ [g/cm$^3$] | Emissività $\varepsilon$ | Albedo $\alpha$ | Calore specifico $C_s$ [J/kg K] | Contenuto residuo di umidità $\theta_r$ [m$^3$/m$^3$] | Contenuto massimo di umidità $\theta_{max}$ [m$^3$/m$^3$] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| GW | 1,95 | 0,92 | 0,4 | 820 | 0,01 | 0,296 |
| GP | 2,16 | 0,92 | 0,4 | 820 | 0,01 | 0,403 |
| GM | 1,91 | 0,95 | 0,4 | 820 | 0,01 | 0,324 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| GC | 1,87 | 0,92 | 0,4 | 820 | 0,01 | 0,34 |
| SW | 1,876 | 0,92 | 0,4 | 830 | 0,01 | 0,32 |
| SP | 1,594 | 0,92 | 0,35 | 816,4 | 0,01 | 0,415 |
| SM | 1,474 | 0,92 | 0,35 | 850,6 | 0,01 | 0,526 |
| SC | 1,88 | 0,92 | 0,35 | 830 | 0,01 | 0,4 |
| ML | 1,457 | 0,94 | 0,4 | 845,7 | 0,01 | 0,464 |
| CL | 1,589 | 0,97 | 0,23 | 854,1 | 0,01 | 0,422 |
| OL | 1,165 | 0,955 | 0,265 | 837,4 | 0,01 | 0,533 |
| CH | 1,517 | 0,98 | 0,3 | 845,7 | 0,01 | 0,457 |
| MH | 1,060 | 0,94 | 0,3 | 830 | 0,01 | 0,547 |
| OH | 0,841 | 0,955 | 0,265 | 866,7 | 0,01 | 0,892 |
| PT | 0,25 | 0,92 | 0,4 | 830 | 0,15 | 0,7 |
| SMSC (MC) | 1,60 | 0,92 | 0,4 | 830 | 0,01 | 0,396 |
| CLML (CM) | 1,617 | 0,96 | 0,3 | 830 | 0,01 | 0,397 |
| EV | 1,876 | 0,92 | 0,4 | 830 | 0,01 | 0,32 |
| CO | 2,185 | 0,9 | 0,4 | 850 | 0,001 | 0,02 |
| AS | 2,5 | 0,94 | 0,125 | 880 | 0,001 | 0,02 |
| RO | 2,7 | 0,89 | 0,4 | 800 | 0,001 | 0,02 |
| SN | 0,92 | 0,9 | 0,7 | - | 0,001 | 0,02 |

| *Legenda* | |
|---|---|
| GW | ghiaie con granulometria ben assortita, miscele di ghiaia-sabbia, pochi o nessun elemento fine |
| GP | ghiaie con granulometria poco assortita, miscele di ghiaia-sabbia, pochi o nessun elemento fine |
| GM | ghiaie con presenza di limo, miscele di ghiaia-sabbia-limo |
| GC | ghiaie argillose, miscele di ghiaia-sabbia-argilla |
| SW | sabbie con granulometria ben assortita, sabbie ghiaiose, pochi o nessun elemento fine |
| SP | sabbie con granulometria poco assortita, sabbie ghiaiose, pochi o nessun elemento fine |
| SM | sabbie con presenza di limo, miscele di sabbia-limo |
| SC | sabbie argillose, miscele di sabbia-argilla |
| ML | limi inorganici e sabbie molto fini, polveri di roccia, sabbie limose o argillose fini o limi argillosi con bassa plasticità |
| CL | argille inorganiche con plasticità da bassa a media, argille ghiaiose, argille sabbiose, argille limose, argille magre |
| OL | limi organici e argille limose con bassa plasticità |
| CH | limi inorganici, elementi fini sabbiosi di mica o diatomite, terreni limosi, limi con proprietà elastiche buone |
| MH | argille inorganiche con alta plasticità, argille grasse |
| OH | argille organiche con plasticità da media ad alta, limi organici |
| Pt | torba ed altri terreni ad alto contenuto organico |
| SMSC | miscele di terreni SM e SC |
| CLML | sedimenti minerali solubili in acqua (ad esempio distese di sale |
| EV | proprietà simili a SW |
| CO | calcestruzzo |
| AS | asfalto |
| RO | rocce sedimentarie (si assumono granitiche) |
| SN | nevai perenni o ghiacciai |

*Flusso areico di calore sensibile*

Il flusso di calore sensibile ($H_f$) [W/m$^2$] scambiato tra il manto di vegetazione e l'aria adiacente è influenzato:

- dalla differenza di temperatura tra la superficie della vegetazione e l'aria adiacente [°C];
- dalla velocità del vento [m/s];
- dall'indice di area fogliare (LAI);

ed è pari a

$$H_f = \left(1{,}1 \cdot LAI \cdot \rho_{af} \cdot C_{p,a} \cdot C_f \cdot W_{af}\right) \cdot \left(T_{af} - T_f\right) \tag{4.12}$$

dove

1,1 è il coefficiente correttivo che tiene conto dell'influenza di steli e rami;

$\rho_{af}$ è la densità dell'aria [kg/m$^3$] in prossimità del manto di vegetazione data dalla media della densità dell'aria all'altezza dello strumento di misura ($\rho_a$) e dalla densità dell'aria all'altezza dello strato fogliare ($\rho_f$). Ovvero

$$\rho_{af} = 0{,}5(\rho_a + \rho_f) \tag{4.13}$$

$\rho_a$ e $\rho_f$ sono calcolati in funzione della temperatura secondo la legge dei gas perfetti.

$C_{pa}$ è il calore specifico dell'aria [J/(kg K)]

$C_f$ è il coefficiente di trasferimento di massa relativo allo scambio termico turbolento nel fogliame [-]

$W_{af}$ è la velocità del vento all'altezza del manto di vegetazione [m/s]

$T_{af}$ è la temperatura dell'aria all'altezza del manto di vegetazione [°C], data da

$$T_{af} = (1-\sigma_f)(T_a) + \sigma_f(0{,}3T_a + 0{,}6T_f + 0{,}1T_g) \tag{4.14}$$

dove

$T_a$ è la temperatura dell'aria all'altezza dello strumento di misura [°C]

*Flusso di calore latente*

Il flusso di calore latente ($L_f$) [W/m$^2$] è regolato dalla resistenza stomatica delle foglie, caratteristica che dipende da molteplici fattori quali l'irraggiamento solare, il vapore d'acqua presente nell'aria, la differenza di pressione di vapore d'acqua tra l'interno della foglia e l'ambiente esterno.

Il flusso di calore latente è dato da

$$L_f = l_f LAI \rho_{af} C_f W_{af} r''(q_{af} - q_{f,sat}) \tag{4.15}$$

dove

$l_f$ è il calore latente [J/kg] dato dalla seguente equazione

$$l_f = 1{,}91846 \times 10^6 \left[\frac{T_f}{T_f - 33{,}91}\right]^2 \tag{4.16}$$

$r''$ è un fattore funzione dell'umidità sulla superficie fogliare e dipende della resistenza al passaggio di vapore d'acqua degli stomi della foglia e dell'aria

$$r'' = \frac{r_a}{r_a + r_s} \tag{4.17}$$

dove

$r_a$ è la resistenza al passaggio del vapore acqueo offerta dallo strato di aria in corrispondenza della superficie della foglia [s/m]. Dipende dalla velocità del vento, dalla rugosità della superficie e dalla stabilità atmosferica ed è data da

$$r_a = \frac{1}{c_f W_{af}} \tag{4.18}$$

$r_s$ è la resistenza al passaggio del vapore acqueo degli stomi della foglia [s/m] ed è data da

$$r_s = \frac{r_{s,\min}}{LAI} f_1 f_2 f_3 \tag{4.19}$$

con

$r_{s,\min}$ resistenza stomatica minima [s/m] (caratteristica della tipologia di vegetazione). Alcuni valori sono forniti in tabella 4.1.

$f_1$ fattore funzione dell'irraggiamento [-] pari a

$$\frac{1}{f_1} = \min\left[1, \frac{0{,}004 I_s + 0{,}005}{0{,}81(0{,}004 I_s + 1)}\right] \tag{4.20}$$

$f_2$ fattore funzione del contenuto di umidità in atmosfera [-] pari a

$$\frac{1}{f_2} = \begin{cases} 0 \text{ quando } \theta_r > \bar{\theta} \text{ o } \bar{\theta} > \theta_{\max} \\ \dfrac{\bar{\theta} - \theta_r}{\theta_{\max} - \theta_r} \text{ quando } \theta_r \le \bar{\theta} \le \theta_{\max} \end{cases} \tag{4.21}$$

dove

$\theta_r$ è il contenuto residuo di umidità [m$^3$/m$^3$] (il contenuto di umidità del terreno quando la vegetazione inizia ad appassire). Il suo valore è tipicamente 0,01 m$^3$/m$^3$

$\theta_{\max}$ è il contenuto massimo di umidità [m$^3$/m$^3$] (massima quantità che un terreno può contenere prima che l'acqua inizi a scorrere. Il suo valore varia a seconda del tipo di terreno ma generalmente il suo valore è compreso tra 0,3 e 0,6 m$^3$/m$^3$.

I valori di $\theta_r$ e di $\theta_{\max}$ sono contenuti all'interno della tabella 4.2.

$\bar{\theta}$ è il contenuto medio di umidità in corrispondenza delle radici [m$^3$/m$^3$]

$f_3$ fattore funzione della differenza di pressione di vapore tra l'esterno e l'interno della foglia [-]

$$\frac{1}{f_3} = \exp\left[-g_D\left(e_{f,sat} - e_a\right)\right] \tag{4.22}$$

dove

$g_D$ è una caratteristica propria della vegetazione [$10^{-2}$ Pa$^{-1}$]. Alcuni valori sono contenuti all'interno della tabella 4.1.

$e_{f,sat}$ è la pressione di saturazione del vapore alla temperatura delle foglie [Pa]

$e_a$ è la pressione di vapore dell'aria [Pa]

$q_{af}$ umidità specifica dell'aria in prossimità della vegetazione dato dalla seguente equazione

$$q_{af} = \frac{\left[(1-\sigma_f)q_a + \sigma_f\left(0{,}3q_a + 0{,}6q_{f,sat}r'' + 0{,}1q_{g,sat}M_g\right)\right]}{1 - \sigma_f\left[0{,}6(1-r'') + 0{,}1(1-M_g)\right]} \tag{4.23}$$

con

$q_a$ umidità specifica dell'aria

$q_{f,sat}$ umidità specifica a livello dello strato fogliare per valori di umidità relativa pari al 100%

$q_{g,sat}$ umidità specifica a livello del terreno per valori di umidità relativa pari al 100%

$M_g$ grado di umidità del terreno [-]

*Equazione di bilancio: terreno*

Il bilancio termico a livello della superficie del terreno è soprattutto influenzato dalle caratteristiche del terreno stesso: le proprietà termiche del terreno, la percentuale di copertura del terreno ($\sigma_f$) e la quantità di umidità nel terreno.

L'equazione di bilancio a livello della superficie dello strato di coltura è la seguente

$$F_g = (1-\sigma_f)\left[I_s(1-\alpha_g)+\varepsilon_g I_{ir}-\varepsilon_g \sigma T_g^4\right]-\frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1}\left(T_g^4-T_f^4\right)+H_g+L_g+K\cdot\frac{\partial T_g}{\partial z} \qquad (4.24)$$

Nel seguito sono sviluppate in dettaglio le metodologie per il calcolo dei singoli contributi dell'equazione di bilancio a livello del terreno.

*Scambi termici radiativi*

Gli scambi termici radiativi sono, al pari dell'equazione di bilancio a livello dello strato fogliare, la somma dei seguenti contributi:

- quota di radiazione solare assorbita dal terreno funzione del coefficiente di riflessione del terreno ($\alpha_g$);
- quota di radiazione nell'infrarosso assorbita dal terreno funzione dell'emissività del terreno stesso ($\varepsilon_g$) assumendo che alle alte lunghezze d'onda l'emissività del terreno sia pari al suo coefficiente di assorbimento;
- quota di radiazione nell'infrarosso emessa nell'infrarosso funzione dell'emissività del terreno ($\varepsilon_g$) e della sua temperatura superficiale ($T_g$);
- quota di radiazione nell'infrarosso dovuta alle riflessioni reciproche tra strato di vegetazione e strato di coltura.

*Flusso di calore sensibile*

Il flusso areico di calore sensibile ($H_g$) [W/m$^2$] scambiato dal terreno è dato da

$$H_g = \rho_{ag} C_{p,a} C_{hg} W_{af}\left(T_{af}-T_g\right) \qquad (4.25)$$

dove

$C_{hg}$ è il coefficiente di trasferimento di massa [-] dato dalla combinazione lineare del coefficiente di trasferimento di massa vicino al terreno e il coefficiente di trasferimento di massa in prossimità

della vegetazione dato dalla seguente equazione. È funzione della rugosità del terreno e dello strato di vegetazione.

$$C_{\mathrm{hg}} = \Gamma_{\mathrm{h}} \left[ (1-\sigma_{\mathrm{f}}) C_{\mathrm{hng}} + \sigma_{\mathrm{f}} C_{\mathrm{hnf}} \right] \tag{4.26}$$

dove $C_{\mathrm{hng}}$ e $C_{\mathrm{hnf}}$ sono i coefficienti di trasferimento di massa funzione della rugosità del terreno e dello strato di vegetazione mentre $\Gamma_{\mathrm{h}}$ è un fattore correttivo [-].

*Flusso di calore latente*

L'evaporazione del dell'umidità contenuta nel terreno dipende dalla differenza tra l'umidità specifica della superficie del suolo e dell'aria e dalla velocità del vento in corrispondenza del manto fogliare.

Il flusso di calore latente è dato da

$$L_{\mathrm{g}} = C_{\mathrm{e,g}} l_{\mathrm{g}} W_{\mathrm{af}} \rho_{\mathrm{ag}} \left( q_{\mathrm{af}} - q_{\mathrm{g}} \right) \text{ [W/m}^2\text{]} \tag{4.27}$$

dove

$C_{\mathrm{e,g}}$ è il coefficiente di trasferimento di massa vicino al terreno [-] dato da

$$C_{\mathrm{e,g}} = \Gamma_{\mathrm{e}} \left[ (1-\sigma_{\mathrm{f}}) C_{\mathrm{eng}} + \sigma_{\mathrm{f}} C_{\mathrm{hnf}} \right]$$

dove $C_{\mathrm{eng}}$ è il coefficiente di trasferimento di massa [-] in adiacenza al terreno e $\Gamma_{\mathrm{e}} = \Gamma_{\mathrm{h}}$

$l_{\mathrm{g}}$ è il calore latente [J/kg] alla temperatura superficiale del terreno

$q_{\mathrm{af}}$ è l'umidità specifica [-] dell'interfaccia tra foglia e aria

$q_{\mathrm{g}}$ è l'umidità specifica [-] sulla superficie del terreno data da

$$q_{\mathrm{g}} = M_{\mathrm{g}} q_{\mathrm{g,sat}} + (1 - M_{\mathrm{g}}) q_{\mathrm{af}} \tag{4.28}$$

*Linearizzazione delle equazioni*

Al fine di ricavare le temperature superficiali rispettivamente del manto di vegetazione ($T_{\mathrm{f}}$) e del terreno ($T_{\mathrm{g}}$), entrambe le equazioni di bilancio (equazioni 4.4 e 4.24) vengono svolte simultaneamente applicando una procedura di tipo iterativo. La procedura iterativa si dimostra infatti necessaria perché le equazioni di bilancio da cui si intendono ricavare le temperature superficiali sono funzione delle temperature superficiali stesse.

Le equazioni 4.4 e 4.24 vengono infine linearizzate e portate alla forma seguente

$$c_1^{\mathrm{f}} + c_2^{\mathrm{f}} T_{\mathrm{g}} + c_3^{\mathrm{f}} T_{\mathrm{f}} = 0 \tag{4.29}$$

$$c_1^{\mathrm{g}} + c_2^{\mathrm{g}} T_{\mathrm{g}} + c_3^{\mathrm{g}} T_{\mathrm{f}} = 0 \tag{4.30}$$

dove i coefficienti $c_1^{\mathrm{f}}$, $c_2^{\mathrm{f}}$, $c_3^{\mathrm{f}}$, $c_1^{\mathrm{g}}$, $c_2^{\mathrm{g}}$, $c_3^{\mathrm{g}}$ sono funzione dei parametri sopra descritti.

Nomenclatura

| **Simbolo** | **Grandezza** | **Unità di misura** |
|---|---|---|
| $a_r$ | variabile di calcolo per la frazione di radici | [$m^{-1}$] |
| $b_r$ | variabile di calcolo per la frazione di radici | [$m^{-1}$] |
| $C_{e,g}$ | coefficiente di trasferimento di massa vicino al terreno | [-] |
| $C_{eng}$ | coefficiente di trasferimento di massa vicino al terreno in condizioni neutre | [-] |
| $C_f$ | coefficiente di trasferimento di massa relativo allo scambio termico turbolento nel fogliame | [-] |
| $C_{hg}$ | coefficiente di trasferimento di massa | [-] |
| $C_{hnf}$ | coefficienti di trasferimento di massa funzione della rugosità della vegetazione in condizioni neutre | [-] |
| $C_{hng}$ | coefficienti di trasferimento di massa funzione della rugosità del terreno in condizioni neutre | [-] |
| $C_{pa}$ | calore specifico dell'aria | [J/(kg K)] |
| $C_s$ | calore specifico | [J/(kg K)] |
| $e_a$ | pressione di vapore nell'aria | [Pa] |
| $e_{f,sat}$ | pressione di saturazione del vapore alla temperatura delle foglie | [Pa] |
| $f_1$,$f_2$,$f_3$ | variabili di calcolo | [-] |
| $g_D$ | variabile di calcolo per la resistenza stomatica | [$10^{-2}Pa^{-1}$] |
| $H_f$, $H_g$ | flusso di calore sensibile (attraverso la vegetazione, attraverso il terreno) | [$W/m^2$] |
| $I_{ir}$ | radiazione infrarossa | [$W/m^2$] |
| $I_s$ | irradianza totale | [$W/m^2$] |
| $l$ | calore latente | [J/kg] |
| $LAI$ | indice di area fogliare | [$m^2/m^2$] |
| $LAI_{max}$ | indice di area fogliare massima | [$m^2/m^2$] |
| $LAI_{min}$ | indice di area fogliare minima | [$m^2/m^2$] |
| $L_f$, $L_g$ | flusso di calore latente (attraverso la vegetazione, attraverso il terreno) | [$W/m^2$] |
| $M_g$ | grado di umidità del terreno | [-] |
| $q_{af}$ | umidità specifica dell'aria in prossimità della superficie fogliare | [-] |
| $q_{f,sat}$ | umidità specifica a livello dello strato fogliare per valori di umidità relativa pari al 100% | [-] |
| $q_g$ | umidità specifica dell'aria in prossimità della superficie del terreno | |
| $q_{g,sat}$ | umidità specifica a livello del terreno per valori di umidità relativa pari al 100% | [-] |
| $r''$ | fattore di umidità sulla superficie fogliare | [-] |
| $r_a$ | resistenza atmosferica alla diffusione del vapore | [s/m] |
| $r_s$ | resistenza stomatica alla diffusione del vapore | [s/m] |
| $r_{s,min}$ | resistenza stomatica minima alla diffusione del vapore acqueo | [s/m] |
| $r_{s,min}$ | resistenza stomatica massima alla diffusione del vapore acqueo | [s/m] |
| $T$ | temperatura | [K] |
| $T_a$ | temperatura dell'aria all'altezza dello strumento di misura | [m] |
| $T_{af}$ | temperatura dell'aria in prossimità della superficie fogliare | [K] |
| $W_{af}$ | velocità del vento in prossimità della superficie fogliare | [m/s] |
| $Z_f$ | altezza | [m] |
| $Z_{f,max}$ | altezza massima | [m] |
| $Z_{f,min}$ | altezza minima | [m] |
| $\alpha_f$ | coefficiente di riflessione della vegetazione | [-] |
| $\alpha_g$ | coefficiente di riflessione del terreno | [-] |
| $\gamma_d$ | densità del terreno asciutto | [$kg/m^3$] |
| $\Gamma_h$ | fattore correttivo | [-] |
| $\varepsilon_f$ | emissività della vegetazione | [-] |
| $\varepsilon_g$ | emissività del terreno | [-] |
| $\theta$ | contenuto medio di umidità in prossimità delle radici | [$m^3/m^3$] |

| | | |
|---|---|---|
| $\theta_r$ | contenuto residuo di umidità | [$m^3/m^3$] |
| $\theta_{max}$ | contenuto massimo di umidità | [$m^3/m^3$] |
| $\rho_{ag}$ | densità dell'aria in prossimità della superficie fogliare | [$kg/m^3$] |
| $\rho_a$ | densità dell'aria all'altezza dello strumento di misura | [$kg/m^3$] |
| $\rho_f$ | densità dell'aria nella vegetazione | [$kg/m^3$] |
| $\sigma_f$ | percentuale di copertura della vegetazione | [%] |
| $\sigma_{f,min}$ | percentuale minima di copertura della vegetazione | [%] |
| $\sigma_{f,max}$ | percentuale massima di copertura della vegetazione | [%] |
| $\sigma$ | costante di Stefan-Boltzman | [$W/(m^2K^4)$] |

## 4.5 Metodo per il calcolo di una trasmittanza termica periodica equivalente della copertura verde

In questo paragrafo viene descritta una metodologia alternativa per il calcolo della trasmittanza termica periodica equivalente di una copertura verde. Si è scelto infatti questo parametro termico dinamico per descrivere il comportamento dinamico di tale tecnologia.

La metodologia di calcolo è quindi stata applicata ad una tipologia di copertura verde e successivamente si è proceduto ad effettuare analisi parametriche al variare di dati progettuali inerenti lo strato di vegetazione e lo strato di coltura al fine di indagare quali tra i parametri progettuali selezionati fossero maggiormente influenti sul valore della trasmittanza termica periodica.

Al fine di effettuare analisi parametriche su modelli di copertura verde caratterizzati da dati di ingresso realistici, è stata svolta un'indagine bibliografica al fine di individuare parametri fisico tecnici specifici per materiali componenti la tecnologia analizzata.

### *4.5.1 Metodologia di indagine*

Al fine di fornire una caratterizzazione termica di un componente di involucro non convenzionale, è stata sviluppata una metodologia indagine per il calcolo di un parametro termico dinamico, ovvero la trasmittanza termica periodica, secondo la procedura individuata da Corrado e Paduos (Corrado e Paduos, 2009).

Il calcolo di un parametro prestazionale relativo ad un sistema di copertura verde risulta alquanto importante perché, nonostante la legislazione nazionale e regionale promuova l'utilizzo di tali tecnologie di involucro (D.P.R. 59/2009, Allegato Energetico-Ambientale al regolamento edilizio della città di Torino), non vi sono al momento metodi specifici e univocamente adottati per il calcolo della loro prestazione.

Il calcolo della prestazione energetica della copertura verde, in termini di trasmittanza termica stazionaria, viene infatti effettuato secondo la metodologia della UNI EN ISO 6946 mentre in termini di parametri termini dinamici secondo la metodologia della UNI EN ISO 13786.

In riferimento al calcolo dei parametri termici dinamici, come è stato precedentemente affermato all'interno del sottoparagrafo 4.2.1, la metodologia di calcolo prevede che la forzante termica sia

costituita dalla temperatura dell'aria caratterizzata da andamento di tipo sinusoidale avente un periodo costante.

Inoltre tale metodologia non prende in considerazione i fenomeni di scambio termico propri della copertura verde che sono stati descritti all'interno del paragrafo 4.4.

Al fine di individuare un parametro termico maggiormente rappresentativo per le coperture verdi, è stata pertanto calcolata la trasmittanza termica periodica attraverso una metodologia che prevede di considerare:

- una temperatura esterna equivalente ($\theta_{e,eq}$) quale forzante termica esterna valutata grazie l'ausilio del codice di simulazione dinamica *EnergyPlus*;
- il flusso termico di tipo conduttivo valutato per alcune soluzioni di copertura verde attraverso l'utilizzo di *EnergyPlus*.

Il calcolo è stato effettuato in un giorno estivo di progetto, il 21 luglio, nella località climatica di Torino caratterizzata dai dati climatici presenti in tabella 4.5.

Tabella 4.5. Dati geografici della località di Torino e dati climatici relativi al giorno estivo di progetto

| | | | |
|---|---|---|---|
| Località | Città | Torino | |
| | Longitudine | 45,08 | [°] |
| | Latitudine | 7,68 | [°] |
| | Altitudine s.l.m. | 239 | [m] |
| Giorno di progetto | $\theta_{max,bs}$ | 30,7 | [°C] |
| | $\Delta\theta_{ae}$ | 11 | [°C] |
| | $I_{m,g,Nord}$ | 79,8 | [W/m$^2$] |
| | $I_{m,g,Sud}$ | 150,0 | [W/m$^2$] |
| | $I_{m,g,Est}$ | 177,3 | [W/m$^2$] |
| | $I_{m,g,Ovest}$ | 211,5 | [W/m$^2$] |
| | $I_{m,g,Orizzontale}$ | 326,0 | [W/m$^2$] |
| | Velocità del vento | 0,8 | [m/s] |

La temperatura esterna equivalente è stata pertanto calcolata secondo l'equazione seguente

$$\theta_{e,eq} = \theta_{ae} + \frac{I\alpha + h_{r,gr}\left(\theta_{gr} - \theta_{ae}\right) + h_{r,sk}\left(\theta_{sk} - \theta_{ae}\right)}{h_e} \tag{4.31}$$

dove

$\theta_{ae}$ è la temperatura dell'aria esterna [°C]

$I$ è l'irradianza solare [W/m$^2$]

$\alpha$ è il coefficiente di assorbimento solare della superficie [-]

$h_{r,gr}$ è il coefficiente di scambio termico radiativo tra il componente e il terreno (nullo per componenti di copertura piana) [W/(m$^2$ K)]

$\theta_{gr}$ è la temperatura superficiale del terreno [°C]

$h_{r,sk}$ è il coefficiente di scambio termico radiativo tra il componente e la volta celeste [W/(m$^2$ K)]

$\theta_{sk}$ è la temperatura della volta celeste [°C]

$h_e$ è il coefficiente di scambio termico liminare di scambio termico calcolato come [W/(m$^2$ K)]

$$h_e = h_{conv} + h_{r,air} + h_{r,gr} + h_{r,sk} \tag{4.32}$$

dove

$h_{conv}$ è il coefficiente di scambio termico convettivo [W/(m$^2$ K)]

$h_{r,air}$ è il coefficiente di scambio termico radiativo tra il componente e l'aria [W/(m$^2$ K)]

I coefficienti liminari ($h_{r,gr}$, $h_{r,sk}$, $h_{conv}$ e $h_{r,air}$), così come le temperature della volta celeste ($\theta_{sk}$), dell'aria esterna ($\theta_{ae}$) e del terreno ($\theta_{gr}$), sono state valutate per ogni intervallo di tempo di 0,25 h dal programma *EneryPlus* utilizzato per le simulazioni dinamiche e rielaborate manualmente per ricavare la temperatura esterna equivalente.

Inoltre, il valore massimo della temperatura dell'aria ($\theta_{max,bs}$), nonché l'escursione termica giornaliera ($\Delta\theta_{ae}$), così come la velocità e la direzione del vento, e le coordinate geografiche, sono ricavati dalla norma UNI 10349.

L'andamento orario giornaliero della temperatura dell'aria esterna e della radiazione solare per ogni esposizione è ricavato dal modello di cielo sereno adottato dall'ASHRAE ed implementato in *EnergyPlus*. In figura 4.6 è visualizzato l'andamento giornaliero della temperatura esterna mentre in figura 4.7 l'andamento giornaliero dell'irradianza solare su superficie orizzontale.

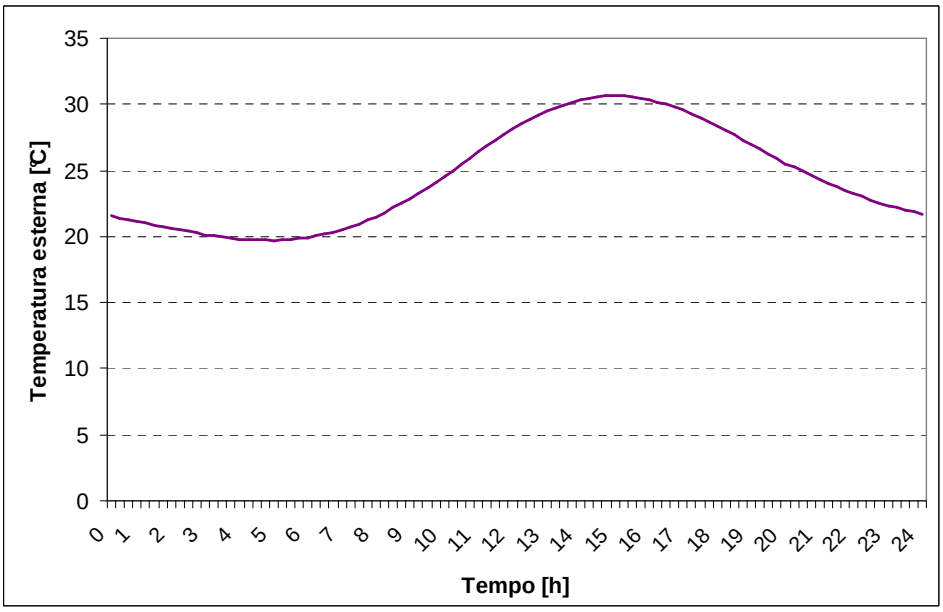



Figura 4.6. Andamento giornaliero della temperatura esterna (Torino, 21 luglio).

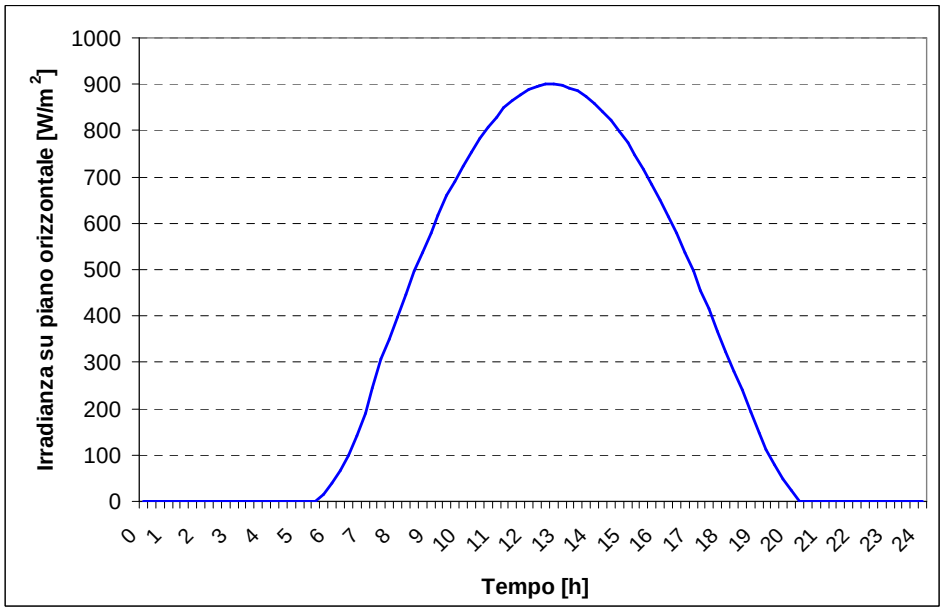



Figura 4.7. Andamento giornaliero dell'irradianza solare su superficie orizzontale (Torino, 21 luglio).

La temperatura esterna equivalente così calcolata è funzione, non solo della località climatica, ma anche di alcune caratteristiche dell'elemento termico considerato, in particolare

- del coefficiente di assorbimento solare ($\alpha$)
- dell'orientamento e dell'inclinazione della superficie.

Si sottolinea che ci si è rivolti all'analisi di componenti orizzontali: per questo motivo la temperatura equivalente calcolata risulta indipendente dalla componente di scambio termico radiativa tra elemento tecnico e terreno ($h_{r,gr}\cdot(\theta_{gr}-\theta_{ae})$).

In figura 4.8 è possibile visualizzare l'andamento della temperatura equivalente calcolata per tre diversi fattori di assorbimento solare rispettivamente pari a 0,6, 0,7 e 0,8 ovvero per i fattori di assorbimento caratteristici di sistemi di copertura verde (cfr. sottoparagrafo 4.5.2).

In figura 4.9 è invece possibile confrontare l'andamento della temperatura equivalente per una copertura con coefficiente solare medio ($\alpha = 0,7$) con l'andamento della temperatura esterna.

Come si può notare i due profili di temperatura seguono lo stesso andamento nelle ore di assenza di irraggiamento solare sul componente orizzontale, con temperatura equivalente inferiore della temperatura esterna a causa dello scambio termico radiativo verso la volta celeste. Durante le ore di irraggiamento solare, invece, la temperatura equivalente segue il profilo dell'irradianza con picco massimo di temperatura verso le ore 13.

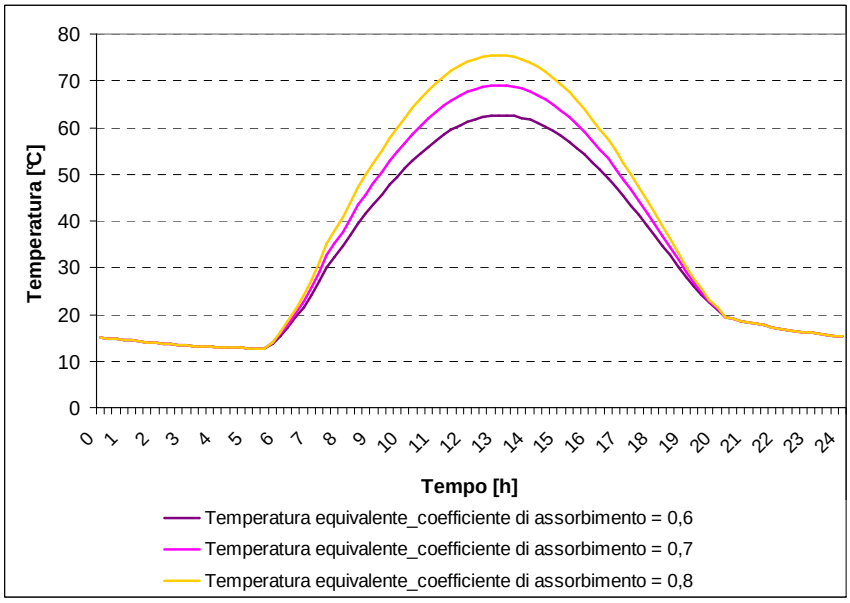



Figura 4.8. Andamento giornaliero della temperatura equivalente calcolata per coperture verdi orizzontali e per diversi coefficienti di assorbimento solare (Torino, 21 luglio).

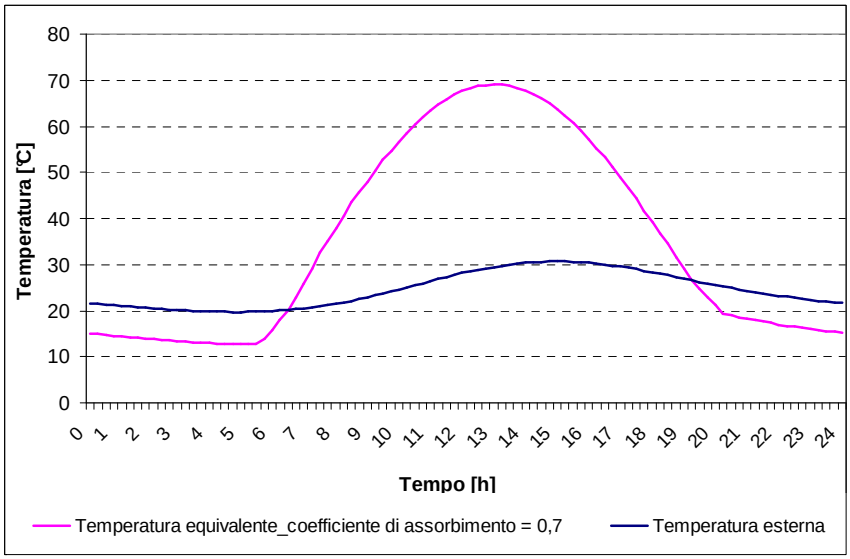



Figura 4.9. Andamento giornaliero della temperatura equivalente calcolata per coperture verdi orizzontali con coefficiente di assorbimento solare pari a 0,7 e confronto con l'andamento della temperatura esterna (Torino, 21 luglio).

Il calcolo della trasmittanza termica periodica dei componenti analizzati viene pertanto condotto secondo quanto specificato al sottoparagrafo 3.2.2 sviluppando l'equazione 4.1 attraverso la seguente

$$Y_{ie} = \frac{\left(\Phi_{cond,max} - \Phi_{cond,min}\right)_{si}^{dyn,CFD}}{\left(\theta_{e,eq,max} - \theta_{e,eq,min}\right)} \tag{4.33}$$

dove

$\Phi_{cond,max}$ è il flusso termico conduttivo massimo sul lato interno del componente [W]

$\Phi_{cond,min}$ è il flusso termico conduttivo minimo sul lato interno del componente [W]

$\theta_{e,eq,max}$ è la temperatura esterna equivalente massima [°C]

$\theta_{e,eq,min}$ è la temperatura esterna equivalente minima [°C]

A partire dal flusso termico per conduzione sul lato interno (si) del componente edilizio calcolato attraverso il metodo dinamico (*dyn*) implementato in *EnergyPlus* e valutato con il metodo alle funzioni di trasferimento (CFD), nonché in funzione della temperatura esterna equivalente calcolata, viene calcolata la trasmittanza termica periodica $Y_{ie}$.

In particolare, la trasmittanza termica periodica viene calcolata come il rapporto tra la differenza dei valori giornalieri massimi e minimi del flusso termico conduttivo sul lato interno del componente e la differenza dei valori giornalieri massimi e minimi della temperatura esterna equivalente.

### *4.5.2 Parametri di ingresso*

Al fine di calcolare lo scambio termico attraverso una copertura verde, sono stati analizzati, attraverso indagini all'interno della letteratura scientifica, i dati di ingresso relativi allo strato di vegetazione e di coltura.

In tabella 4.6 sono indicati tutti i dati di ingresso che devono essere noti al fine di effettuare il calcolo secondo il modello implementato in *EnergyPlus*. Il metodo di calcolo FASST, come indicato all'interno del paragrafo 4.4, fornisce alcuni valori per ciascun parametro di ingresso, come indicato nella stessa tabella 4.6.

Tabella 4.6. Dati di ingresso relativi allo strato di vegetazione e di terreno

| STRATO DI VEGETAZIONE | Unità di misura | Valori |
|---|---|---|
| Altezza delle piante | [m] | 0,02 ÷ 1,00 |
| Indice di area fogliare (LAI) | [-] | 0,001 ÷ 5 |
| Coefficiente di riflessione delle foglie | [-] | 0,1 ÷ 0,4 |
| Emissività delle foglie | [-] | 0,8 ÷ 1,0 |
| Resistenza stomatica minima | [s/m] | 50 ÷ 300 |

| STRATO DI TERRENO | Unità di misura | Valori |
|---|---|---|
| Rugosità | [-] | molto rugoso, rugoso, mediamente rugoso, mediamente liscio, liscio, molto liscio |
| Spessore | [m] | 0,06 ÷ 0,50 |
| Conducibilità termica del terreno asciutto | [W/(mK)] | 0,2 ÷ 1,0 |
| Densità del terreno asciutto | [kg/m$^3$] | 300 ÷ 2000 |
| Calore specifico del terreno asciutto | [J/(kgK)] | 600 ÷ 2000 |
| Coefficiente di assorbimento (termico) | [-] | 0,9 ÷ 1,0 |
| Coefficiente di assorbimento (solare) | [-] | 0,4 ÷ 0,9 |
| Contenuto di umidità a saturazione nel terreno | [m$^3$/m$^3$] | 0,2 ÷ 1,0 |
| Contenuto residuo di umidità nel terreno | [m$^3$/m$^3$] | 0,01 ÷ 0,1 |
| Contenuto iniziale di umidità nel terreno | [m$^3$/m$^3$] | 0,1 ÷ 1,0 |

In assenza di dati specifici sono stati pertanto utilizzati i dati di ingresso in tabella. Si sono invece approfondite alcune caratteristiche termiche relative alla tipologia di terreno adatta per coperture verdi. Infatti, i dati riportati da S. Frankenstein e G.G. Koenig (Frankenstein e Koenig, 2004) sono relativi a tipologie di terreno non adatti per coltura (tabella 4.3 all'interno del paragrafo 4.4).
Al fine di utilizzare parametri di ingresso maggiormente realistici, è stata svolta un'indagine volta in particolare a rintracciare valori di
- conducibilità termica [W/(m K)]
- densità [kg/m$^3$]
- calore specifico [J/(kg K)]
- coefficiente di assorbimento solare [-]

relativi a tipologie di terreni adatti per coperture verdi.
Inoltre, essendo alcune di queste caratteristiche dipendenti le une dalle altre (è il caso della conducibilità termica e della densità) si è inoltre indagata una correlazione tra questi parametri.

Sailor, Hutchinson e Bokovoy (Sailor et al, 2008) al fine di modellare correttamente una copertura verde, hanno misurato diversi campioni di terreno adatto per questa tecnologia al fine di ottenere risultati relativamente alla conducibilità termica del terreno, al calore specifico, al coefficiente di riflessione solare (albedo) e alla densità.
Le tipologie di terreno oggetto di sperimentazione sono generalmente costituite da aggregati alleggeriti di materiale inorganico, compost e sabbia. Questa tipologia di terreno trova largo uso negli Stati Uniti variando composizione in funzione della reperibilità di materie prime.
In tabella 4.7 sono indicate le tipologie di terreno individuate.

Tabella 4.7. Composizione (in percentuale sul volume) e contenuto di umidità a saturazione per le tipologie di terreno analizzate (Sailor et al, 2008).

| **Codice terreno** | **Pomice** | **Argilla espansa** | **Compost** | **Sabbia** | **Contenuto di umidità a saturazione** |
|---|---|---|---|---|---|
| | % | % | % | % | g/g |
| **DH01** | 50 | 0 | 10 | 40 | 0,32 |
| **DH02** | 50 | 0 | 0 | 50 | 0,3 |
| **DH03** | 75 | 0 | 0 | 25 | 0,43 |
| **DH04** | 75 | 0 | 10 | 15 | 0,44 |
| **DH05** | 0 | 50 | 10 | 40 | 0,23 |
| **DH06** | 0 | 50 | 0 | 50 | 0,23 |
| **DH07** | 0 | 75 | 0 | 25 | 0,22 |
| **DH08** | 0 | 75 | 10 | 15 | 0,24 |

Di tutte le tipologie di terreno analizzato sono state condotte sperimentazioni al variare del contenuto di umidità nel terreno. I risultati sperimentali relativamente alla misura delle caratteristiche sopra citate sono contenuti all'interno della tabella 4.8.

Tabella 4.8. Proprietà termiche relative alle tipologie di terreno analizzate (Sailor et al, 2008).

| **Codice terreno** | **Contenuto di umidita`** | **Densita`** $\rho_{gr}$ | **Conducibilità termica** $\lambda_{gr}$ | **Calore specifico** $c_{gr}$ | **Albedo** $\rho_{gr}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| | **[%]** | **[kg/m$^3$]** | **[W/(m K)]** | **[J/(kg K)]** | **[-]** |
| **DH01** | **0** | **1020** | **0,17** | **1093** | **0,28** |
| | 13 | 1020 | 0,25 | 1090 | 0,17 |
| | 26 | 1020 | 0,28 | 1181 | 0,11 |
| | 62 | 1140 | 0,45 | 1356 | 0,06 |
| **DH02** | **0** | **1130** | **0,18** | **1032** | **0,41** |
| | 13 | 1080 | 0,30 | 1084 | 0,23 |
| | 26 | 1070 | 0,31 | 1149 | 0,15 |
| | 64 | 1170 | 0,48 | 1375 | 0,16 |
| **DH03** | **0** | **880** | **0,17** | **1227** | **0,38** |
| | 11 | 870 | 0,20 | 999 | 0,26 |
| | 22 | 870 | 0,24 | 1217 | 0,21 |
| | 55 | 940 | 0,34 | 1388 | 0,09 |
| **DH04** | **0** | **760** | **0,14** | **1251** | **0,39** |
| | 13 | 760 | 0,20 | 1123 | 0,29 |
| | 25 | 770 | 0,21 | 1284 | 0,22 |
| | 59 | 870 | 0,31 | 1602 | 0,21 |
| **DH05** | **0** | **1360** | **0,20** | **887** | **0,17** |
| | 14 | 1350 | 0,34 | 952 | 0,12 |
| | 27 | 1350 | 0,38 | 884 | 0,06 |
| | 69 | 1420 | 0,57 | 1259 | 0,04 |
| **DH06** | **0** | **1400** | **0,21** | **890** | **0,19** |
| | 13 | 1370 | 0,33 | 830 | 0,10 |
| | 26 | 1390 | 0,46 | 1005 | 0,06 |
| | 67 | 1470 | 0,62 | 1125 | 0,05 |
| **DH07** | **0** | **1117** | **0,20** | **966** | **0,18** |
| | 18 | 1200 | 0,31 | 961 | 0,13 |
| | 35 | 1200 | 0,34 | 978 | 0,09 |
| | 87 | 1290 | 0,46 | 1085 | 0,07 |
| **DH08** | **0** | **1060** | **0,18** | **1093** | **0,18** |
| | 17 | 1060 | 0,26 | 1035 | 0,13 |
| | 33 | 1060 | 0,30 | 1144 | 0,08 |
| | 82 | 1150 | 0,41 | 1151 | 0,06 |

In figura 4.10 è rappresentato il grafico che rappresenta la variazione di conducibilità termica dei terreni rispetto alla variazione del prodotto tra densità e calore specifico dei terreni. Sono stati presi in considerazione solo i terreni con 0% di contenuto di umidità. In figura 4.11 sono stati invece inseriti tutti i terreni analizzati al variare dell'umidità contenuta.

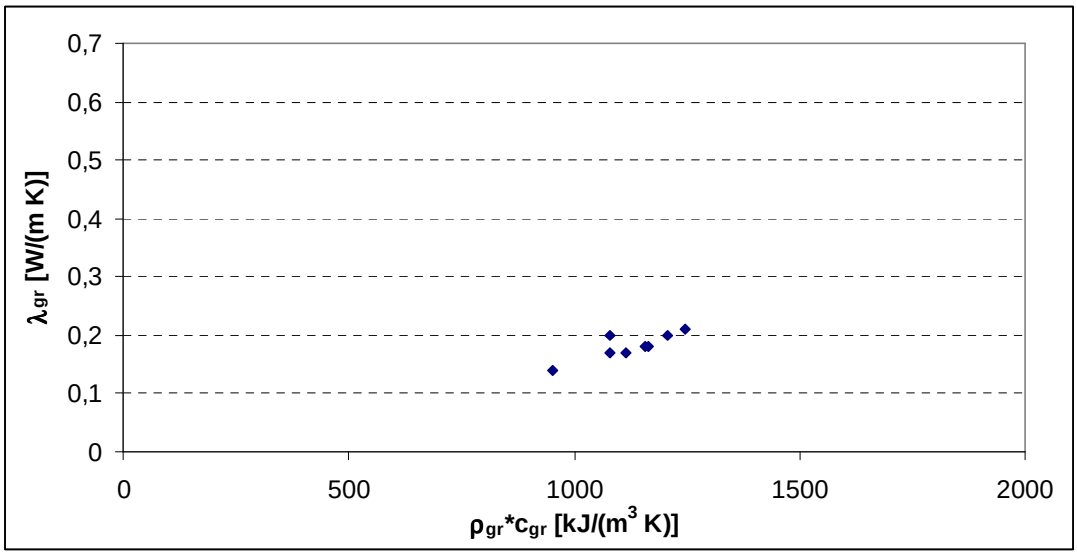



Figura 4.10. Andamento della conducibilità termica in funzione del prodotto $\rho \cdot c$ per terreni asciutti rispetto ai valori monitorati da Sailor (Sailor, 2008).

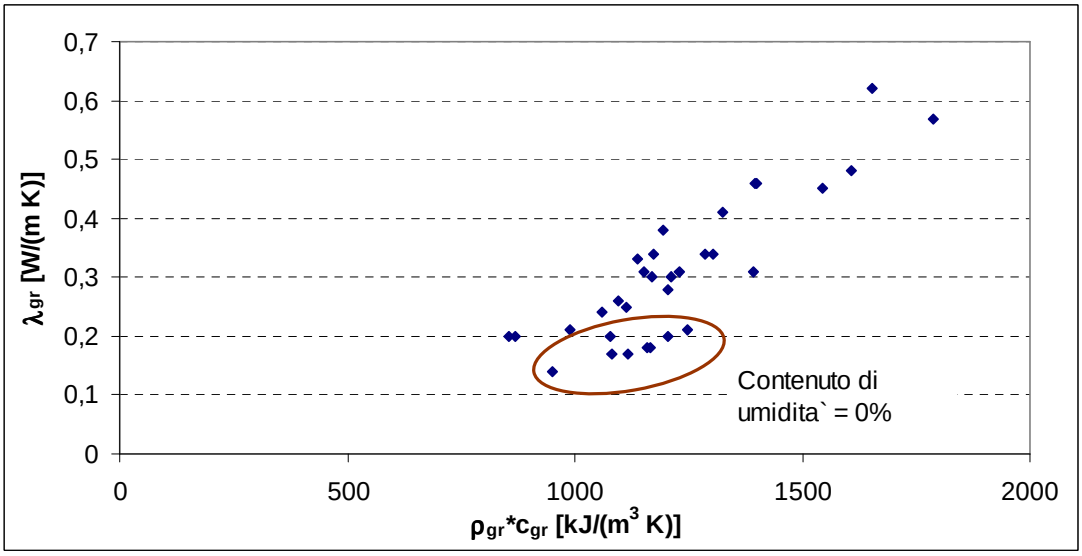



Figura 4.11. Andamento della conducibilità termica in funzione del prodotto $\rho \cdot c$ per terreni con diverse percentuali di contenuto di umidità rispetto ai valori monitorati da Sailor (Sailor, 2008).

Altre informazioni riguardo le proprietà termiche dei terreni, sebbene non dei terreni utilizzati per coperture verdi, sono contenute all'interno dello stesso metodo FASST e alcune di queste sono state riportate all'interno della tabella 4.3 paragrafo 4.4.

Al fine di ricavare la conducibilità termica del terreno asciutto in funzione della densità del terreno asciutto, il modello FASST utilizza la correlazione empirica di Farouki (Farouki, 1981) di seguito riportata

$$\lambda_{gr} = \frac{0{,}135 \cdot \rho_{gr} + 64{,}7}{2700 - 0{,}947 \cdot \rho_{gr}} \pm 20\% \qquad (4.34)$$

dove la densità del terreno $\rho_{gr}$ è espressa in g/cm$^3$.

Si riportano all'interno della tabella 4.9 i valori densità e calore specifico dei terreni già forniti in tabella 4.4 e i valori di conducibilità termica calcolati secondo l'equazione 4.34 per alcune delle tipologie di terreno individuate all'interno del modello FASST. All'interno della figura 4.12 è quindi possibile visualizzare l'andamento della conducibilità dei terreni rispetto al prodotto $\rho_{gr} \cdot c_{gr}$.

Tabella 4.9. Proprietà termiche di alcune tipologie di terreno individuate dal modello FASST.

| **Codice terreno*** | **Densita`** $\rho_{gr}$ | **Densita`** $\rho_{gr}$ | **Conducibilità termica** $\lambda_{gr}$ | **Calore specifico** $c_{gr}$ | $\rho_{gr} \cdot c_{gr}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| | **[kg/m$^3$]** | **[g/cm$^3$]** | **[W/(m K)]** | **[J/(kg K)]** | **[J/(m$^3$ K)]** |
| **GW** | 1950 | 1,95 | 0,38 | 820,0 | 1.599.000 |
| **GP** | 2160 | 2,16 | 0,54 | 820,0 | 1.771.200 |
| **GM** | 1910 | 1,91 | 0,36 | 820,0 | 1.566.200 |
| **GC** | 1870 | 1,87 | 0,34 | 820,0 | 1.533.400 |
| **SW** | 1876 | 1,876 | 0,34 | 830,0 | 1.557.080 |
| **SP** | 1594 | 1,594 | 0,24 | 816,4 | 1.301.342 |
| **SM** | 1474 | 1,474 | 0,20 | 850,6 | 1.253.784 |
| **SC** | 1880 | 1,88 | 0,35 | 830,0 | 1.560.400 |
| **ML** | 1457 | 1,457 | 0,20 | 845,7 | 1.232.185 |
| **CL** | 1589 | 1,589 | 0,23 | 854,1 | 1.357.165 |
| **OL** | 1165 | 1,165 | 0,14 | 837,4 | 975.571 |
| **CH** | 1517 | 1,517 | 0,21 | 845,7 | 1.282.927 |
| **MH** | 1060 | 1,06 | 0,12 | 830,0 | 879.800 |
| **OH** | 841 | 0,841 | 0,09 | 866,7 | 728.895 |
| **PT** | 250 | 0,25 | 0,04 | 830,0 | 207.500 |
| **SMSC** | 1600 | 1,6 | 0,24 | 830,0 | 1.328.000 |
| **CLML** | 1617 | 1,617 | 0,24 | 830,0 | 1.342.110 |

* Per visualizzare il codice dei terreni cifra tabella 4.4 paragrafo 4.4.

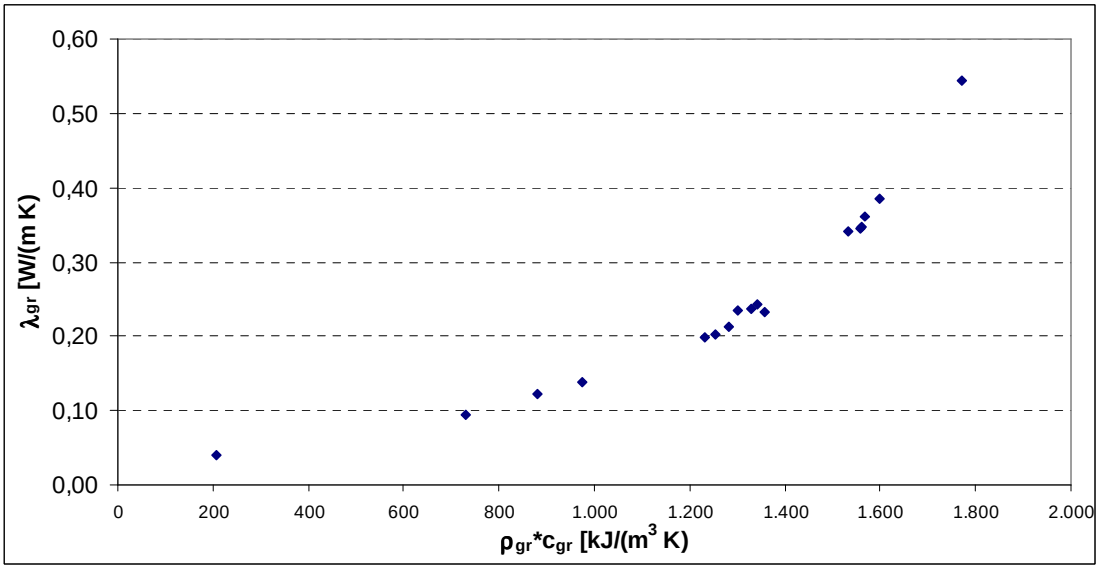



Figura 4.12. Andamento della conducibilità termica in funzione del prodotto $\rho \cdot c$ per terreni con diverse percentuali di contenuto di umidità rispetto all'equazione di correlazione fornita da Farouki (Farouki, 1981).

Un'ulteriore fonte da cui sono stati ricavate le proprietà di alcune tipologie di terreno è la norma UNI EN ISO 13370.

All'interno dell'Allegato G, tabella G.1, sono indicate le proprietà termiche per alcune tipologie di terreno anche in questo caso non specificamente utilizzabili per coperture verdi.

All'interno della tabella 4.10 si riportano i valori della norma. L'ultima colonna della tabella contiene inoltre il calcolo di $\rho_{gr} \cdot c_s$ per terreni asciutti secondo l'equazione 4.35 individuata all'interno della UNI EN ISO 13370 per il calcolo di $\rho_{gr} \cdot c_s$ per terreni in presenza di umidità. All'interno del calcolo è stato considerato $c_w \cdot u = 0$.

Tabella 4.10. Proprietà termiche di alcune tipologie di terreno (Fonte: UNI EN ISO 13370)

| Tipologia di terreno | Densità $\rho_{gr}$ | Conducibilità termica $\lambda_{gr}$ | Contenuto di umidità | $\rho_{gr} \cdot c_s$ |
|---|---|---|---|---|
| | [kg/m$^3$] | [W/(m K)] | [kg/kg] | [J/(m$^3$ K)] |
| **Limo** | 1400-1800 | 1,0 - 2,0 | 0,1 - 0,3 | 1600000 |
| **Argilla** | 1200-1600 | 0,9 - 1,4 | 0,2 - 0,4 | 1400000 |
| **Torba** | 400-1100 | 0,2 - 0,5 | 0,05 - 2,0 | 750000 |
| **Sabbia** | 1700-2000 | 1,1 - 2,2 | 0,04 - 0,12 | 1850000 |

$$\rho_{gr} c_{gr} = \rho_{gr} \left( c_s + c_w u \right) \tag{4.35}$$

dove

$\rho_{gr}$ è la densità di terreni asciutti [kg/m$^3$]

$c_{gr}$ è il calore specifico di terreni asciutti [J/(kg K)]

$c_s$ è il calore specifico dei minerali. In assenza di informazioni specifiche può essere assunto pari a 1000 [J/(kg K)]

$c_w$ è il calore specifico dell'acqua pari a 4180 [J/(kg K)] a 10°C

$u$ è il contenuto di umidità [%]

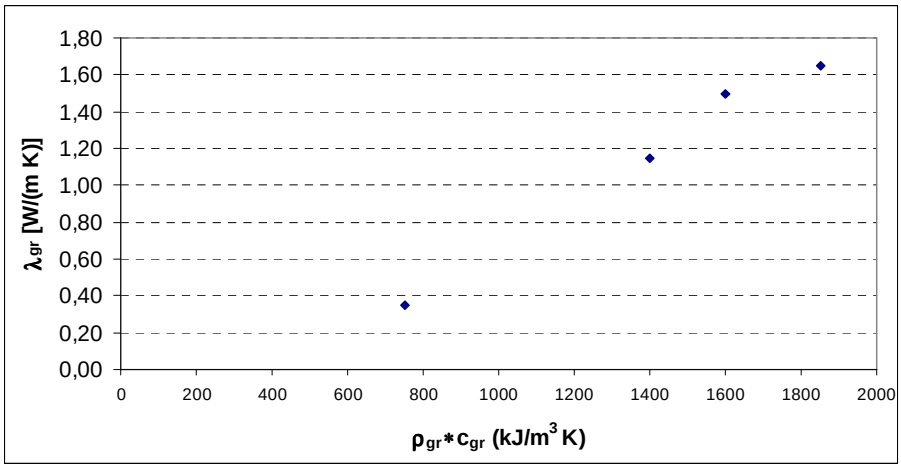



Figura 4.13. Andamento della conducibilità termica in funzione del prodotto $\rho \cdot c$ per terreni asciutti secondo la norma UNI EN ISO 13370.

In figura 4.14 sono visualizzabili in un solo grafico i tre andamenti di conducibilità termica in funzione del prodotto $\rho \cdot c$ per terreni asciutti.

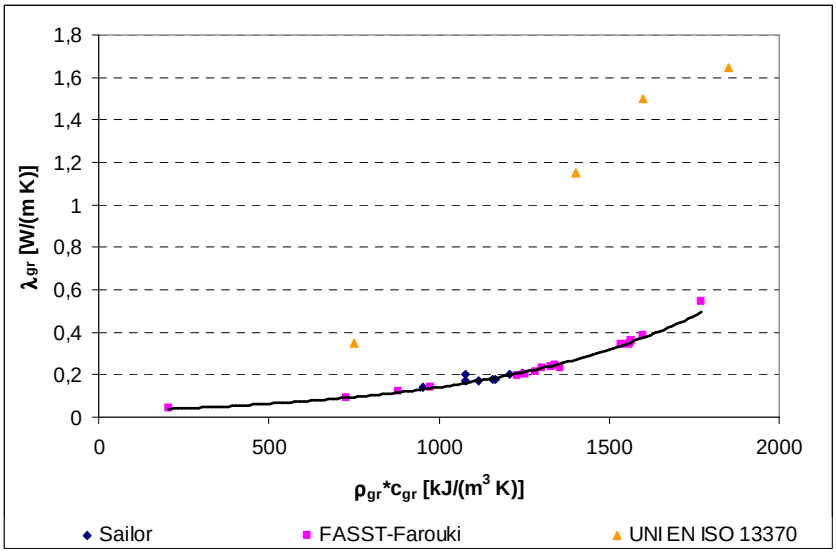



Figura 4.14. Andamento della conducibilità termica in funzione del prodotto $\rho \cdot c$ per terreni asciutti secondo le tre fonti consultate.

Come è possibile notare dalla figura 4.14, la variazione della conducibilità termica in funzione del calore specifico normalizzato al metro cubo segue andamenti simili per i valori ricavati da monitoraggio da Sailor et al. e per i valori ricavati attraverso la correlazione empirica di Farouki.

Si può ricavare pertanto una correlazione generale per entrambi i metodi visualizzabile dalla linea di tendenza sul grafico la cui equazione ha la seguente forma

$$\lambda_{gr} = 0{,}0281^{0{,}001 \cdot \rho_{gr} \cdot c_{gr}} \tag{4.36}$$

Rispetto al numero complessivo di tipologie di terreni individuate, i valori ricavati attraverso indagini sperimentali su terreni specifici per coperture verdi sono caratterizzati da bassi valori di conducibilità termica e valori intermedi di calore specifico per metro cubo di terreno.

Si può inoltre notare che i valori ricavati dalla UNI EN ISO 13370 sovrastimano enormemente le proprietà termiche del terreno.

Tenuto conto di quanto esposto, al fine di condurre simulazioni parametriche su tipologie "realistiche" di coperture verdi, sono stati individuati i parametri di ingresso secondo quanto indicato in tabella 4.11.

In particolare, per quanto concerne le caratteristiche dello strato di vegetazione, sono stati utilizzati i parametri proposti dalla metodologia FASST; per quanto concerne le proprietà del terreno sopra discusse (conducibilità termica, calore specifico, densità e coefficiente di assorbimento solare) sono state considerate le proprietà delle tipologie di terreno rilevate da Sailor, secondo quanto precedentemente esposto.

Altre caratteristiche del terreno sono state considerate fisse.

Tenuto conto del fatto che alcune caratteristiche relative sia allo strato di vegetazione che di terreno variano in funzione della tipologia di copertura verde, sono stati considerati diversi valori di ingresso

in funzione che copertura verde sia di tipo intensivo, estensivo o semi-intensivo. In particolare l'altezza dello strato di vegetazione e lo spessore di terreno variano in funzione della tipologia di copertura verde.

Tabella 4.11. Parametri di ingresso relativi a strato di vegetazione e di terreno.

| **CARATTERISTICHE DELLA VEGETAZIONE** | | | |
|---|---|---|---|
| | **Campo di variazione** | **Passo di calcolo** | **Valori di partenza** |
| **Altezza delle piante** | **COPERTURA ESTENSIVA** | | |
| | 10-20 [cm] | 1 [cm] | 15 [cm] |
| | **COPERTURA SEMI-INTENSIVA** | | |
| | 20-50 [cm] | 1 [cm] | 35 [cm] |
| | **COPERTURA INTENSIVA** | | |
| | 50-100 [cm] | 1 [cm] | 75 [cm] |
| **LAI** | 0,0015-5 [-] | 0,5 [-] | 1,5 [-] |
| **Coefficiente di riflessione** | 0,1-0,4 [-] | 0,025 [-] | 0,22 [-] |
| **Emissività** | 0,8-1 [-] | 0,025 [-] | 0,95 [-] |
| **Resistenza stomatica** | 50-300 [s/m] | 20 [s/m] | 180 [s/m] |

| **CARATTERISTICHE DEL TERRENO** | | | |
|---|---|---|---|
| | **Campo di variazione** | **Passo di calcolo** | **Valori di partenza** |
| **Rugosità** | Molto rugoso-moderatamente rugoso-rugoso-liscio-moderatamente liscio-molto liscio | | Rugoso |
| **Spessore** | **COPERTURA ESTENSIVA** | | |
| | 0,05-0,15 [m] | 0,01 [m] | 0,1 [m] |
| | **COPERTURA SEMI-INTENSIVA** | | |
| | 0,15-0,35 [m] | 0,01 [m] | 0,25 [m] |
| | **COPERTURA INTENSIVA** | | |
| | 50-75 [cm] | 0,01 [m] | 65 [cm] |
| **Coefficiente di assorbimento (termico)** | | | 0,9 [-] |
| **Coefficiente di assorbimento (visibile)** | | | 0,7 [-] |
| **Contenuto di umidità a saturazione** | | | 0,5 [$m^3/m^3$] |
| **Contenuto residuo di umidità** | | | 0,01 [$m^3/m^3$] |
| **Contenuto iniziale di umidità** | | | 0,15 [$m^3/m^3$] |
| **Conduttività termica** | * DH01, DH02, DH03,DH04, DH05,DH06,DH07,DH08 | | DH01 |
| **Densità** | | | |
| **Calore specifico** | | | |
| **Coefficiente di assorbimento** | | | |

* I codici indicati in tabella corrispondono ai terreni di composizione indicata all'interno della tabella 4.6.

Al fine di effettuare le simulazioni parametriche, alcune proprietà della vegetazione e del terreno sono considerate variabili secondo il campo di variazione e il passo di calcolo specificato in tabella 4.11. Al variare di un determinato parametro, i restanti sono stati mantenuti fissi secondo il valore di

partenza specificato nella stessa tabella e corrispondente ad un valore medio rispetto al campo di variazione.

### *4.5.3 Descrizione del caso di studio*

Per la modellazione della copertura verde in *EnergyPlus* si è considerata una *test-room* di forma cubica avente le seguenti caratteristiche:

- assenza di componenti trasparenti
- assenza di schermatura solare
- tutte le pareti e il pavimento sono considerati adiabatici ad eccezione della copertura verde

Tale spazio delimitato è stato modellato per poter disporre di un volume di controllo specifico al quale poter attribuire una temperatura interna.

Le condizioni al contorno considerate sono, per quanto concerne l'ambiente esterno, i dati climatici descritti all'interno della tabella 4.5; per quanto concerne l'ambiente interno è stata fissata una temperatura di *set point* fissa pari a 26°C.

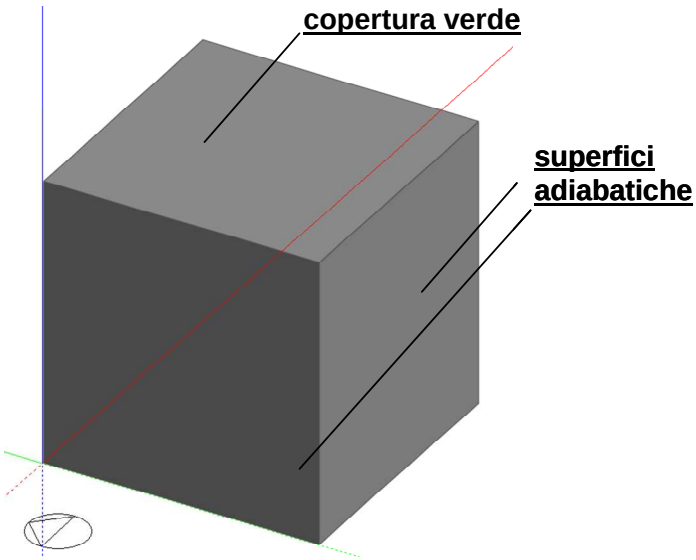



Figura 4.15. Modello di *test-room* per il calcolo dello scambio termico attraverso la copertura verde.

Le chiusure verticali e il solaio inferiore adiabatici che delimitano il volume di controllo sono caratterizzati dalla stratigrafia riportata nella tabella 4.12.

Tabella 4.12. Stratigrafia dei componenti di involucro della *test-room*.

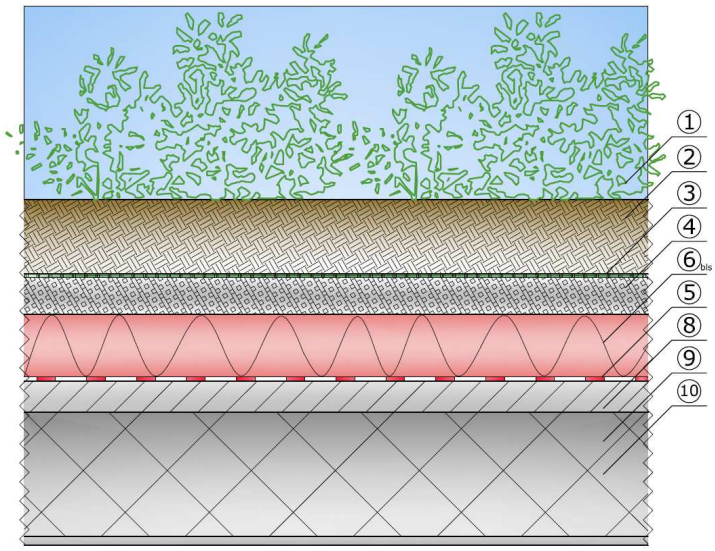
| | | STRATIGRAFIA | $S$ | $\lambda$ | $\rho$ | $c_p$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | *esterno - interno* | [m] | [W/(m K)] | [kg/m$^3$] | [J/(kg K)] |
| CHIUSURA VERTICALE | I | intonaco | 0,02 | 0,41 | 900 | 840 |
| | II | laterizio | 0,05 | 0,9 | 2000 | 840 |
| | III | isolante | 0,1 | 0,035 | 90 | 1000 |
| | IV | laterizio | 0,15 | 0,9 | 2000 | 840 |
| | V | intonaco | 0,01 | 0,7 | 1400 | 840 |
| SOLAIO INFERIORE | I | solaio laterocemento | 0,2 | 0,39 | 1680 | 848 |
| | II | soletta | 0,05 | 1,16 | 2000 | 880 |
| | III | sottofondo | 0,1 | 0,31 | 1000 | 880 |

| | | STRATIGRAFIA | S | λ | ρ | $c_p$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ***esterno - interno*** | **[m]** | **[W/(m K)]** | **[kg/m$^3$]** | **[J/(kg K)]** |
| | IV | isolante | 0,08 | 0,035 | 90 | 990 |
| | V | barriera al vapore | 0,003 | 0,055 | 2500 | 840 |
| | VI | calcestruzzo magro | 0,03 | 0,31 | 1000 | 880 |
| | VII | piastrelle | 0,02 | 0,94 | 2300 | 840 |
| **SOLAIO DI COPERTURA** | I | vegetazione | - | - | - | - |
| | II | terreno | vedi Tabella 4.10 | | | |
| | III | geotessile | 0,005 | 0,06 | 160 | 2500 |
| | IV | strato drenante | 0,06 | 0,08 | 800 | 920 |
| | V | isolante termico | 0 0,05 0,10 | 0,035 | 90 | 990 |
| | VI | impermeabilizzante | 0,007 | 0,17 | 1200 | 920 |
| | VII | barriera al vapore | 0,003 | 0,055 | 2500 | 840 |
| | VIII | soletta | 0,05 | 1,16 | 2000 | 880 |
| | IX | solaio latero-cemento | 0,20 | 0,39 | 1680 | 848 |
| | X | intonaco | 0,015 | 0,35 | 1200 | 840 |

La copertura analizzata è il tetto rovescio (figura 4.16).

Al fine di indagare il comportamento di tale componente di involucro al variare della sua resistenza termica, sono stati considerati tre livelli di isolamento termico. In particolare:

- isolamento termico nullo al fine di indagare le caratteristiche di resistenza termica della sola copertura verde;
- 5 cm di isolante termico;
- 10 cm di isolante termico.




Legenda:

1. Vegetazione
2. Terreno
3. Geotessile
4. Strato drenante
5. Strato impermeabile
6. Isolante termico con funzione di barriera al vapore
8. Massetto di pendenza
9. Solaio in laterocemento
10. Intonaco

Figura 4.16. Stratigrafia del tetto rovescio.

Per ogni configurazione così individuata sono state condotte simulazioni parametriche al variare dei parametri di ingresso caratteristici degli strati di vegetazione e di terreno secondo quanto indicato all'interno della tabella 4.10.

### *4.5.4 Analisi parametriche*

*Tetto estensivo*

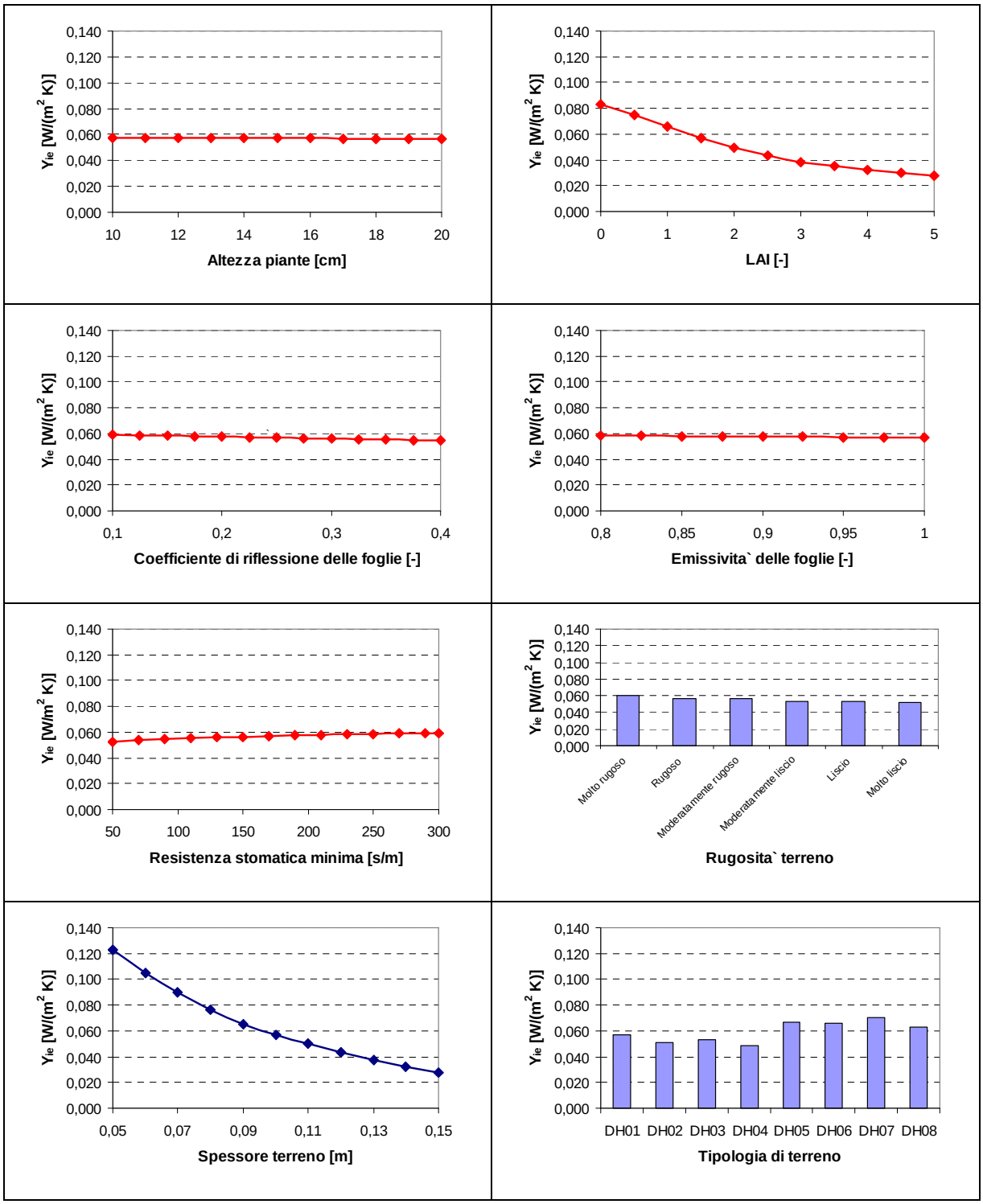



Figura 4.17. Andamenti della trasmittanza termica periodica $Y_{ie}$ al variare delle proprietà del terreno (grafici in blu) e della vegetazione (grafici in rosso) per coperture estensive senza isolante termico.

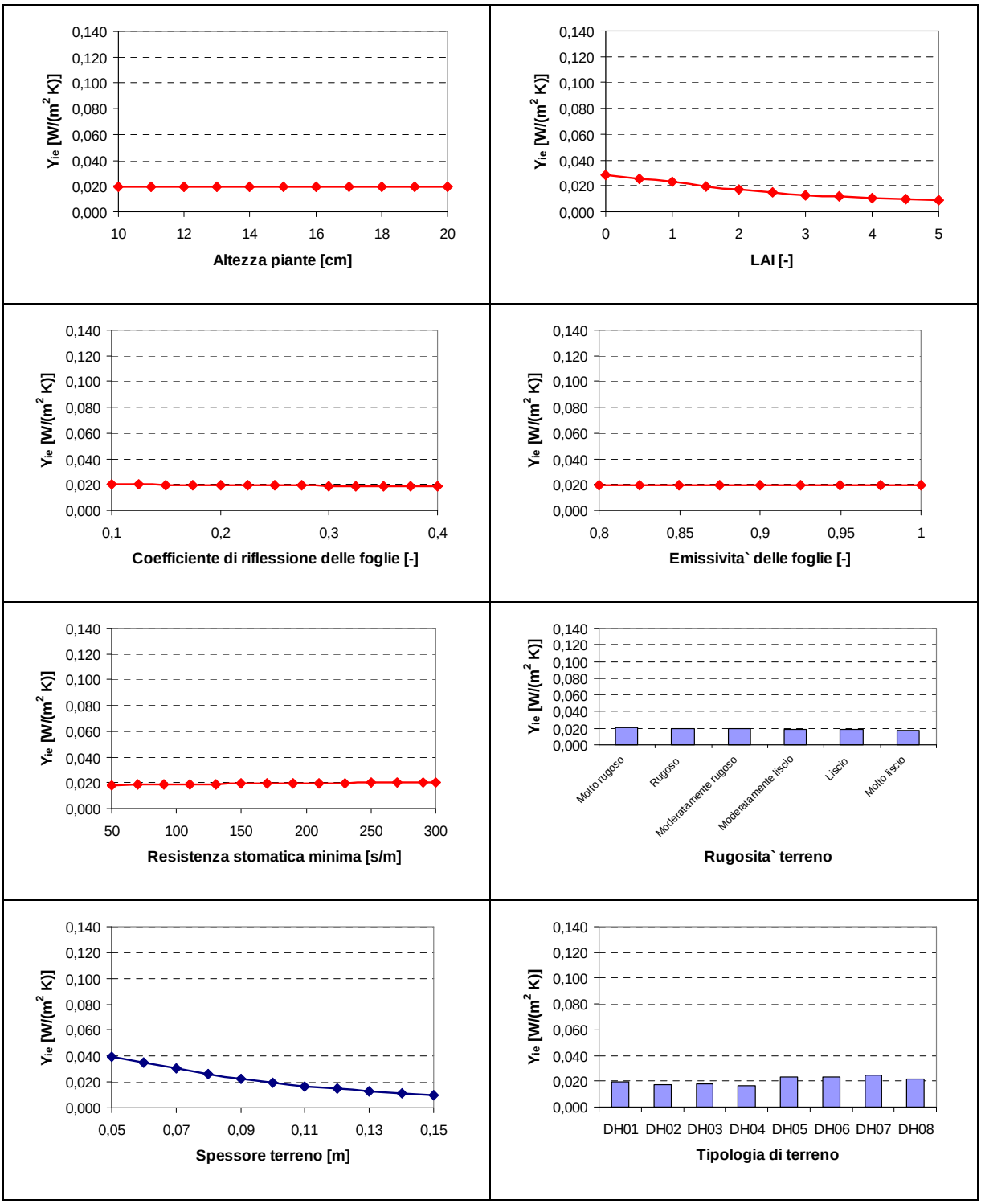



Figura 4.18. Andamenti della trasmittanza termica periodica $Y_{ie}$ al variare delle proprietà del terreno (grafici in blu) e della vegetazione (grafici in rosso) per coperture estensive con 5 cm di isolante termico.

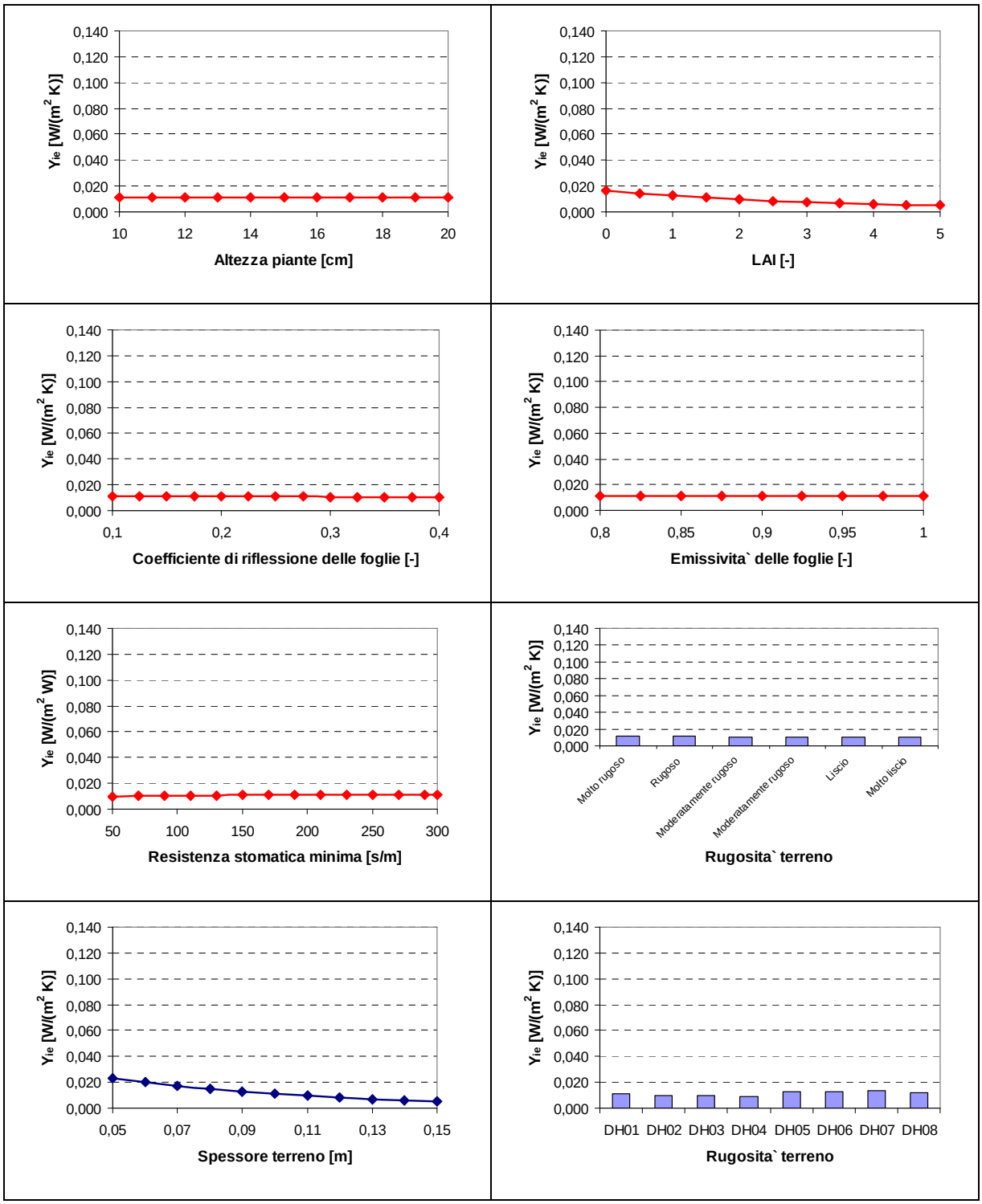



Figura 4.19. Andamenti della trasmittanza termica periodica $Y_{ie}$ al variare delle proprietà del terreno (grafici in blu) e della vegetazione (grafici in rosso) per coperture estensive con 10 cm di isolante termico.

Tabella 4.13. Valori di $Y_{ie}$ al variare dei parametri di ingresso relativi allo strato di vegetazione e di terreno per uno spessore di isolamento termico = 0 cm.

| **Spessore di isolante termico = 0 cm** | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Altezza piante [cm] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | LAI [-] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Coefficiente riflessione foglie [-] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Emissività foglie [-] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Resistenza stomatica [s/m] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Rugosità terreno | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Spessore terreno [m] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Tipologia terreno | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] |
| 10 | 0,057 | 0,0015 | 0,083 | 0,1 | 0,059 | 0,8 | 0,058 | 50 | 0,053 | Molto rugoso | 0,061 | 0,05 | 0,123 | DH01 | 0,057 |
| 11 | 0,057 | 0,5 | 0,075 | 0,125 | 0,058 | 0,825 | 0,058 | 70 | 0,054 | Rugoso | 0,057 | 0,06 | 0,105 | DH02 | 0,051 |
| 12 | 0,057 | 1 | 0,066 | 0,15 | 0,058 | 0,85 | 0,058 | 90 | 0,055 | Moderatamente rugoso | 0,056 | 0,07 | 0,090 | DH03 | 0,053 |
| 13 | 0,057 | 1,5 | 0,057 | 0,175 | 0,058 | 0,875 | 0,058 | 110 | 0,055 | Moderatamente liscio | 0,053 | 0,08 | 0,076 | DH04 | 0,048 |
| 14 | 0,057 | 2 | 0,049 | 0,2 | 0,057 | 0,9 | 0,058 | 130 | 0,056 | Liscio | 0,053 | 0,09 | 0,065 | DH05 | 0,066 |
| 15 | 0,057 | 2,5 | 0,043 | 0,225 | 0,057 | 0,925 | 0,057 | 150 | 0,056 | Molto liscio | 0,052 | 0,1 | 0,057 | DH06 | 0,066 |
| 16 | 0,057 | 3 | 0,038 | 0,25 | 0,057 | 0,95 | 0,057 | 170 | 0,057 | | | 0,11 | 0,050 | DH07 | 0,071 |
| 17 | 0,057 | 3,5 | 0,035 | 0,275 | 0,056 | 0,975 | 0,057 | 190 | 0,057 | | | 0,12 | 0,044 | DH08 | 0,063 |
| 18 | 0,057 | 4 | 0,032 | 0,3 | 0,056 | 1 | 0,057 | 210 | 0,058 | | | 0,13 | 0,037 | | |
| 19 | 0,057 | 4,5 | 0,030 | 0,325 | 0,056 | | | 230 | 0,058 | | | 0,14 | 0,032 | | |
| 20 | 0,057 | 5 | 0,028 | 0,35 | 0,055 | | | 250 | 0,058 | | | 0,15 | 0,028 | | |
| | | | | 0,375 | 0,055 | | | 270 | 0,059 | | | | | | |
| | | | | 0,4 | 0,055 | | | 290 | 0,059 | | | | | | |
| | | | | | | | | 300 | 0,059 | | | | | | |

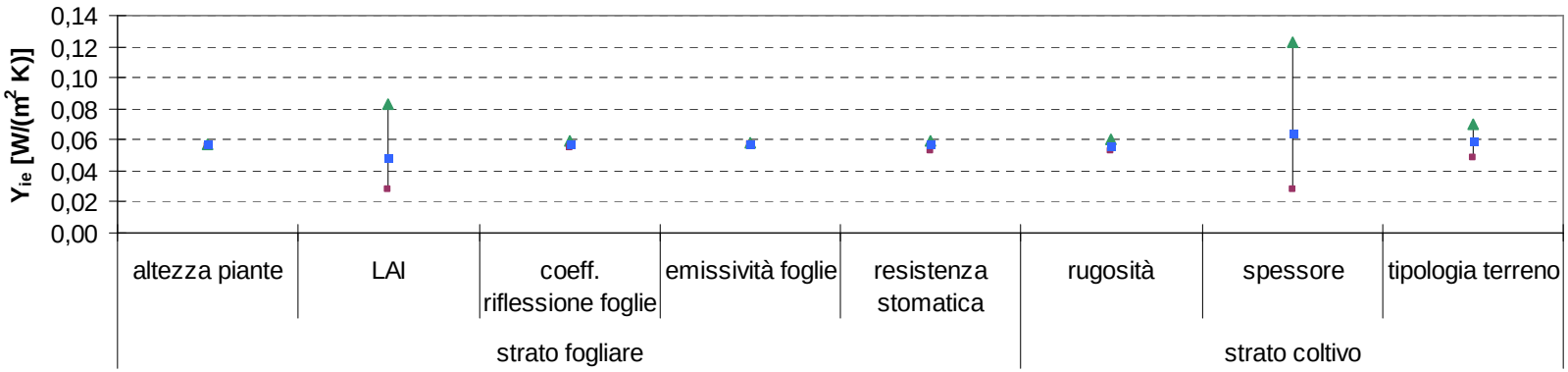



Figura 4.20. Variazione del valore di trasmittanza termica periodica $Y_{ie}$ al variare dei parametri di ingresso di un tetto rovescio estensivo. Spessore di isolante = 0 cm

Tabella 4.14. Valori di $Y_{ie}$ al variare dei parametri di ingresso relativi allo strato di vegetazione e di terreno per uno spessore di isolamento termico = 5 cm.

| **Spessore di isolante termico = 5 cm** | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Altezza piante [cm] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | LAI [-] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Coefficiente riflessione foglie [-] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Emissività foglie [-] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Resistenza stomatica [s/m] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Rugosità terreno | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Spessore terreno [m] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Tipologia terreno | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] |
| 10 | 0,019 | 0,0015 | 0,029 | 0,1 | 0,020 | 0,8 | 0,020 | 50 | 0,018 | Molto rugoso | 0,021 | 0,05 | 0,039 | DH01 | 0,019 |
| 11 | 0,019 | 0,5 | 0,026 | 0,125 | 0,020 | 0,825 | 0,020 | 70 | 0,018 | Rugoso | 0,019 | 0,06 | 0,035 | DH02 | 0,018 |
| 12 | 0,019 | 1 | 0,023 | 0,15 | 0,020 | 0,85 | 0,020 | 90 | 0,019 | Moderatamente rugoso | 0,019 | 0,07 | 0,031 | DH03 | 0,018 |
| 13 | 0,019 | 1,5 | 0,019 | 0,175 | 0,020 | 0,875 | 0,020 | 110 | 0,019 | Moderatamente liscio | 0,018 | 0,08 | 0,026 | DH04 | 0,017 |
| 14 | 0,019 | 2 | 0,017 | 0,2 | 0,020 | 0,9 | 0,020 | 130 | 0,019 | Liscio | 0,018 | 0,09 | 0,023 | DH05 | 0,023 |
| 15 | 0,019 | 2,5 | 0,015 | 0,225 | 0,019 | 0,925 | 0,019 | 150 | 0,019 | Molto liscio | 0,018 | 0,1 | 0,019 | DH06 | 0,023 |
| 16 | 0,019 | 3 | 0,013 | 0,25 | 0,019 | 0,95 | 0,019 | 170 | 0,019 | | | 0,11 | 0,017 | DH07 | 0,025 |
| 17 | 0,019 | 3,5 | 0,012 | 0,275 | 0,019 | 0,975 | 0,019 | 190 | 0,020 | | | 0,12 | 0,015 | DH08 | 0,022 |
| 18 | 0,019 | 4 | 0,011 | 0,3 | 0,019 | 1 | 0,019 | 210 | 0,020 | | | 0,13 | 0,013 | | |
| 19 | 0,019 | 4,5 | 0,010 | 0,325 | 0,019 | | | 230 | 0,020 | | | 0,14 | 0,011 | | |
| 20 | 0,019 | 5 | 0,009 | 0,35 | 0,019 | | | 250 | 0,020 | | | 0,15 | 0,010 | | |
| | | | | 0,375 | 0,019 | | | 270 | 0,020 | | | | | | |
| | | | | 0,4 | 0,019 | | | 290 | 0,020 | | | | | | |
| | | | | | | | | 300 | 0,020 | | | | | | |

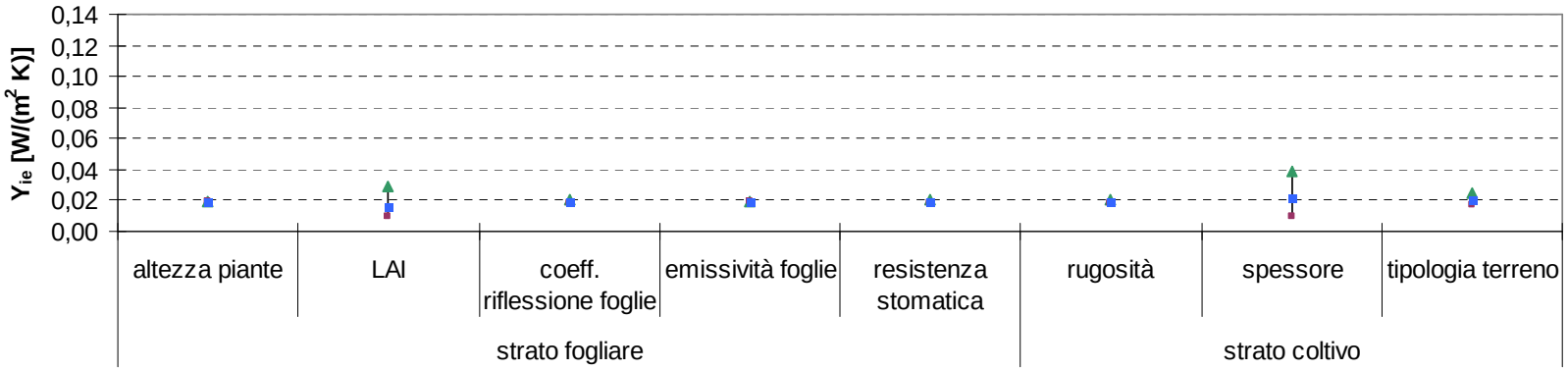



Figura 4.21. Variazione del valore di trasmittanza termica periodica $Y_{ie}$ al variare dei parametri di ingresso di un tetto rovescio estensivo. Spessore di isolante = 5 cm

Tabella 4.15. Valori di $Y_{ie}$ al variare dei parametri di ingresso relativi allo strato di vegetazione e di terreno per uno spessore di isolamento termico = 10 cm.

| **Spessore di isolante termico = 10 cm** | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Altezza piante [cm] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | LAI [-] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Coefficiente riflessione foglie [-] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Emissività foglie [-] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Resistenza stomatica [s/m] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Rugosità terreno | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Spessore terreno [m] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Tipologia terreno | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] |
| 10 | 0,011 | 0,0015 | 0,016 | 0,1 | 0,011 | 0,8 | 0,011 | 50 | 0,010 | Molto rugoso | 0,012 | 0,05 | 0,023 | DH01 | 0,011 |
| 11 | 0,011 | 0,5 | 0,015 | 0,125 | 0,011 | 0,825 | 0,011 | 70 | 0,010 | Rugoso | 0,011 | 0,06 | 0,020 | DH02 | 0,010 |
| 12 | 0,011 | 1 | 0,013 | 0,15 | 0,011 | 0,85 | 0,011 | 90 | 0,011 | Moderatamente rugoso | 0,011 | 0,07 | 0,017 | DH03 | 0,010 |
| 13 | 0,011 | 1,5 | 0,011 | 0,175 | 0,011 | 0,875 | 0,011 | 110 | 0,011 | Moderatamente liscio | 0,010 | 0,08 | 0,015 | DH04 | 0,009 |
| 14 | 0,011 | 2 | 0,009 | 0,2 | 0,011 | 0,9 | 0,011 | 130 | 0,011 | Liscio | 0,010 | 0,09 | 0,013 | DH05 | 0,013 |
| 15 | 0,011 | 2,5 | 0,008 | 0,225 | 0,011 | 0,925 | 0,011 | 150 | 0,011 | Molto liscio | 0,010 | 0,1 | 0,011 | DH06 | 0,013 |
| 16 | 0,011 | 3 | 0,007 | 0,25 | 0,011 | 0,95 | 0,011 | 170 | 0,011 | | | 0,11 | 0,009 | DH07 | 0,014 |
| 17 | 0,011 | 3,5 | 0,006 | 0,275 | 0,011 | 0,975 | 0,011 | 190 | 0,011 | | | 0,12 | 0,008 | DH08 | 0,012 |
| 18 | 0,011 | 4 | 0,006 | 0,3 | 0,011 | 1 | 0,011 | 210 | 0,011 | | | 0,13 | 0,007 | | |
| 19 | 0,011 | 4,5 | 0,005 | 0,325 | 0,011 | | | 230 | 0,011 | | | 0,14 | 0,006 | | |
| 20 | 0,011 | 5 | 0,005 | 0,35 | 0,011 | | | 250 | 0,011 | | | 0,15 | 0,005 | | |
| | | | | 0,375 | 0,011 | | | 270 | 0,011 | | | | | | |
| | | | | 0,4 | 0,011 | | | 290 | 0,011 | | | | | | |
| | | | | | | | | 300 | 0,011 | | | | | | |

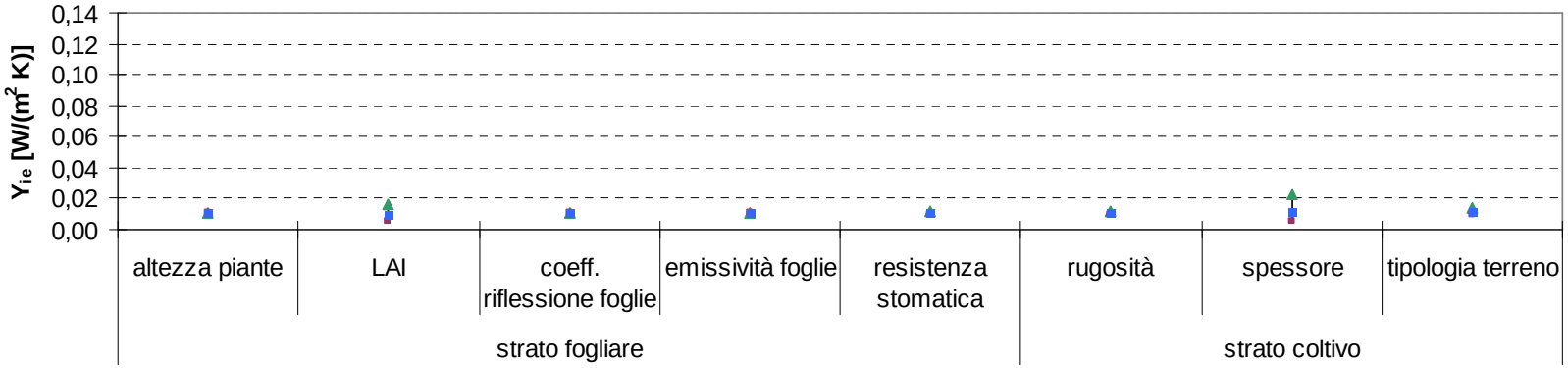



Figura 4.22. Variazione del valore di trasmittanza termica periodica $Y_{ie}$ al variare dei parametri di ingresso di un tetto rovescio estensivo. Spessore di isolante = 10 cm

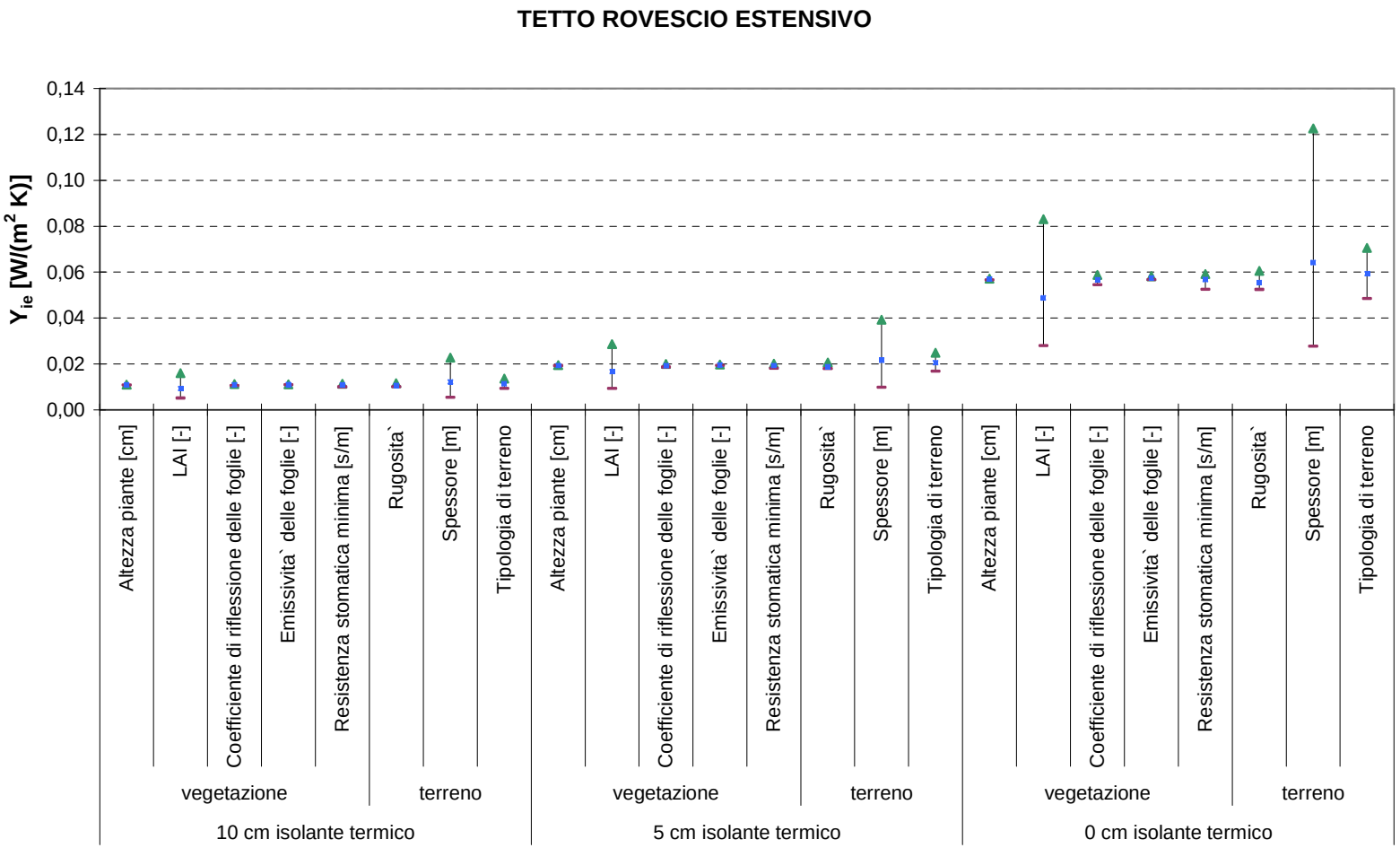



Figura 4.23. Variazione del valore di trasmittanza termica periodica $Y_{ie}$ al variare dei singoli parametri di ingresso degli strati di terreno e vegetazione di un tetto rovescio estensivo.

Come si può notare dalle figure 4.17, 4.18 e 4.19, i parametri la cui variazione maggiormente influisce sulla variazione della trasmittanza termica periodica sono, in ordine di importanza, lo spessore dello strato di coltura e l'indice di area fogliare (LAI). Tali parametri sono maggiormente significativi quando la resistenza termica della copertura è bassa, ovvero quando lo spessore di isolamento termico è limitato o nullo. In particolare, al variare dello spessore di terreno, per una copertura priva di isolante termico, la trasmittanza termica periodica varia da 0,028 W/($m^2$ K) a 0,123 W/($m^2$ K). La variazione dell'indice di area fogliare induce invece uno scostamento di trasmittanza termica periodica da 0,028 W/($m^2$ K) a 0,083 W/($m^2$ K).

All'aumentare dello spessore di isolamento termico, nonostante l'incidenza di tali parametri diminuisca, lo spessore di terreno e l'indice di area fogliare rimangono i parametri più influenti.

Un aspetto da evidenziare riguarda il parametro "tipologia di terreno" che al suo interno comprende sia la conducibilità termica, il calore specifico, il coefficiente di assorbimento solare e la densità. In generale, tale parametro risulta poco influente nella valutazione di $Y_{ie}$ perché, da un lato, sono stati presi in considerazione solo terreni che possono essere utilizzati per coperture verdi, che pertanto sono caratterizzati da proprietà molto simili tra loro; d'altro canto, non è stata considerata la variazione di contenuto di umidità all'interno del terreno, parametro che influenza tutte le proprietà del terreno come si può notare dalla tabella 4.8.

Dalla tabella 4.24 è quindi possibile visualizzare quanto detto finora.

Di seguito si riportano i risultati relativi alle analisi parametriche relative al tetto rovescio con copertura verde di tipo semi-intensivo al variare dei livelli di isolamento termico.

*Tetto semi-intensivo*

Il tetto verde semi-intensivo, come si può notare dalla tabella 4.11, è caratterizzato da spessori di terreno maggiori e da vegetazione di altezza maggiore rispetto alla copertura estensiva. La trasmittanza termica periodica media di tale copertura (0,005 W/($m^2$ K)) è quindi mediamente più bassa rispetto alla trasmittanza termica periodica media della copertura estensiva (0,03 W/($m^2$ K)). Inoltre, la variazione di $Y_{ie}$ della copertura intensiva è minore rispetto alla variazione di $Y_{ie}$ di una copertura semi-intensiva: la deviazione standard di $Y_{ie}$ per copertura estensiva è pari a 0,023 W/($m^2$ K) mentre per la copertura semi-intensiva è 0,004 W/($m^2$ K). Nonostante la variazione di $Y_{ie}$ sia quasi nulla, i parametri che incidono sulla sua variazione rimangono lo spessore del terreno e l'indice di area fogliare.

Si riportano nel seguito tabelle e grafici per visualizzare la variazione di $Y_{ie}$ al variare dei parametri considerati.

Tabella 4.16. Valori di $Y_{ie}$ al variare dei parametri di ingresso relativi allo strato di vegetazione e di terreno per uno spessore di isolamento termico = 0 cm.

| Spessore di isolante termico = 0 cm | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| altezza piante | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | LAI | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Coefficiente riflessione foglie | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Emissività foglie | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Resistenza stomatica [s/m] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Rugosità terreno | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Spessore terreno | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Tipologia terreno | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] |
| 20 | 0,008 | 0,0015 | 0,011 | 0,1 | 0,008 | 0,8 | 0,008 | 50 | 0,006 | Molto rugoso | 0,007 | 0,15 | 0,027 | DH01 | 0,007 |
| 22,5 | 0,008 | 0,5 | 0,009 | 0,125 | 0,008 | 0,825 | 0,008 | 70 | 0,007 | Rugoso | 0,007 | 0,16 | 0,023 | DH02 | 0,006 |
| 25 | 0,008 | 1 | 0,008 | 0,15 | 0,008 | 0,85 | 0,008 | 90 | 0,007 | Moderatamente rugoso | 0,007 | 0,17 | 0,020 | DH03 | 0,007 |
| 27,5 | 0,007 | 1,5 | 0,007 | 0,175 | 0,007 | 0,875 | 0,007 | 110 | 0,007 | Moderatamente liscio | 0,006 | 0,18 | 0,017 | DH04 | 0,006 |
| 30 | 0,007 | 2 | 0,006 | 0,2 | 0,007 | 0,9 | 0,007 | 130 | 0,007 | Liscio | 0,006 | 0,19 | 0,015 | DH05 | 0,009 |
| 32,5 | 0,007 | 2,5 | 0,005 | 0,225 | 0,007 | 0,925 | 0,007 | 150 | 0,007 | Molto liscio | 0,006 | 0,2 | 0,013 | DH06 | 0,009 |
| 35 | 0,007 | 3 | 0,005 | 0,25 | 0,007 | 0,95 | 0,007 | 170 | 0,007 | | | 0,21 | 0,011 | DH07 | 0,010 |
| 37,5 | 0,007 | 3,5 | 0,004 | 0,275 | 0,007 | 0,975 | 0,007 | 190 | 0,007 | | | 0,22 | 0,010 | DH08 | 0,008 |
| 40 | 0,007 | 4 | 0,004 | 0,3 | 0,007 | 1 | 0,007 | 210 | 0,007 | | | 0,23 | 0,009 | | |
| 42,5 | 0,007 | 4,5 | 0,003 | 0,325 | 0,007 | | | 230 | 0,008 | | | 0,24 | 0,008 | | |
| 45 | 0,007 | 5 | 0,003 | 0,35 | 0,007 | | | 250 | 0,008 | | | 0,25 | 0,007 | | |
| 47,5 | 0,007 | | | 0,375 | 0,007 | | | 270 | 0,008 | | | 0,26 | 0,006 | | |
| 50 | 0,007 | | | 0,4 | 0,007 | | | 290 | 0,008 | | | 0,27 | 0,006 | | |
| | | | | | | | | 300 | 0,008 | | | 0,28 | 0,005 | | |
| | | | | | | | | | | | | 0,29 | 0,004 | | |
| | | | | | | | | | | | | 0,3 | 0,004 | | |
| | | | | | | | | | | | | 0,31 | 0,004 | | |
| | | | | | | | | | | | | 0,32 | 0,004 | | |
| | | | | | | | | | | | | 0,33 | 0,004 | | |
| | | | | | | | | | | | | 0,34 | 0,004 | | |
| | | | | | | | | | | | | 0,35 | 0,004 | | |

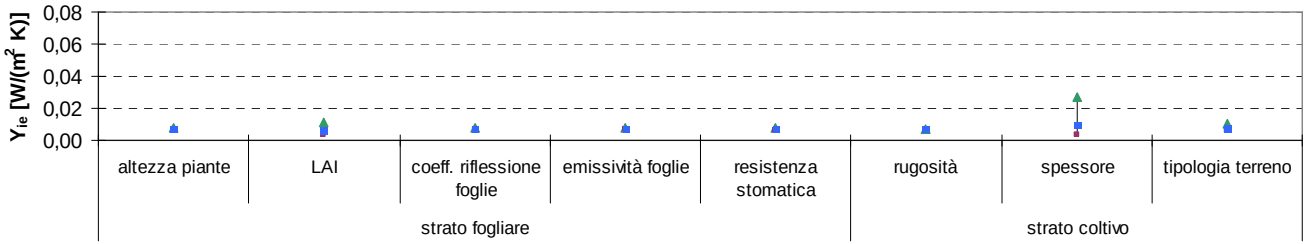



Figura 4.24. Variazione del valore di trasmittanza termica periodica $Y_{ie}$ al variare dei parametri di ingresso di un tetto rovescio semi-intensivo. Spessore di isolante = 0 cm

Tabella 4.17. Valori di $Y_{ie}$ al variare dei parametri di ingresso relativi allo strato di vegetazione e di terreno per uno spessore di isolamento termico = 5 cm.

| Spessore di isolante termico = 0 cm | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| altezza piante | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | LAI | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Coefficiente riflessione foglie | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Emissività foglie | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Resistenza stomatica [s/m] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Rugosità terreno | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Spessore terreno | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Tipologia terreno | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] |
| 20 | 0,003 | 0,0015 | 0,004 | 0,1 | 0,003 | 0,8 | 0,003 | 50 | 0,003 | Molto rugoso | 0,003 | 0,15 | 0,009 | DH01 | 0,003 |
| 22,5 | 0,003 | 0,5 | 0,004 | 0,125 | 0,003 | 0,825 | 0,003 | 70 | 0,003 | Rugoso | 0,003 | 0,16 | 0,008 | DH02 | 0,003 |
| 25 | 0,003 | 1 | 0,003 | 0,15 | 0,003 | 0,85 | 0,003 | 90 | 0,003 | Moderatamente rugoso | 0,003 | 0,17 | 0,007 | DH03 | 0,003 |
| 27,5 | 0,003 | 1,5 | 0,003 | 0,175 | 0,003 | 0,875 | 0,003 | 110 | 0,003 | Moderatamente liscio | 0,003 | 0,18 | 0,006 | DH04 | 0,003 |
| 30 | 0,003 | 2 | 0,003 | 0,2 | 0,003 | 0,9 | 0,003 | 130 | 0,003 | Liscio | 0,003 | 0,19 | 0,006 | DH05 | 0,004 |
| 32,5 | 0,003 | 2,5 | 0,003 | 0,225 | 0,003 | 0,925 | 0,003 | 150 | 0,003 | Molto liscio | 0,003 | 0,2 | 0,005 | DH06 | 0,004 |
| 35 | 0,003 | 3 | 0,002 | 0,25 | 0,003 | 0,95 | 0,003 | 170 | 0,003 | | | 0,21 | 0,004 | DH07 | 0,004 |
| 37,5 | 0,003 | 3,5 | 0,002 | 0,275 | 0,003 | 0,975 | 0,003 | 190 | 0,003 | | | 0,22 | 0,004 | DH08 | 0,003 |
| 40 | 0,003 | 4 | 0,001 | 0,3 | 0,003 | 1 | 0,003 | 210 | 0,003 | | | 0,23 | 0,003 | | |
| 42,5 | 0,003 | 4,5 | 0,001 | 0,325 | 0,003 | | | 230 | 0,003 | | | 0,24 | 0,003 | | |
| 45 | 0,003 | 5 | 0,004 | 0,35 | 0,003 | | | 250 | 0,003 | | | 0,25 | 0,003 | | |
| 47,5 | 0,003 | | | 0,375 | 0,003 | | | 270 | 0,003 | | | 0,26 | 0,003 | | |
| 50 | 0,003 | | | 0,4 | 0,003 | | | 290 | 0,003 | | | 0,27 | 0,003 | | |
| | | | | | | | | 300 | 0,003 | | | 0,28 | 0,003 | | |
| | | | | | | | | | | | | 0,29 | 0,003 | | |
| | | | | | | | | | | | | 0,3 | 0,003 | | |
| | | | | | | | | | | | | 0,31 | 0,003 | | |
| | | | | | | | | | | | | 0,32 | 0,003 | | |
| | | | | | | | | | | | | 0,33 | 0,003 | | |
| | | | | | | | | | | | | 0,34 | 0,003 | | |
| | | | | | | | | | | | | 0,35 | 0,003 | | |

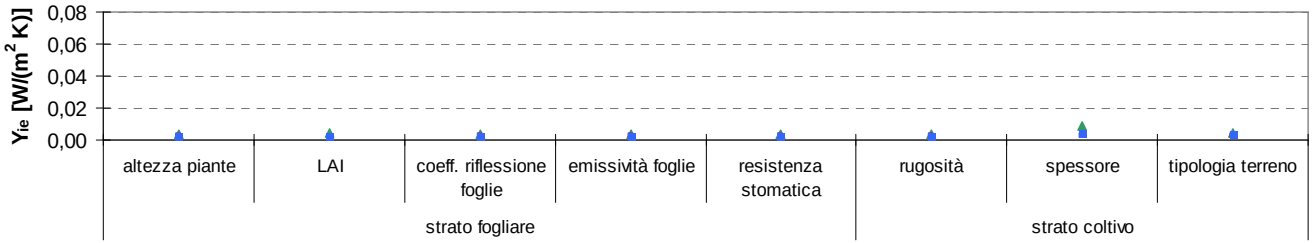



Figura 4.25. Variazione del valore di trasmittanza termica periodica $Y_{ie}$ al variare dei parametri di ingresso di un tetto rovescio estensivo. Spessore di isolante = 5 cm

Tabella 4.18. Valori di $Y_{ie}$ al variare dei parametri di ingresso relativi allo strato di vegetazione e di terreno per uno spessore di isolamento termico = 10 cm.

| **Spessore di isolante termico = 0 cm** | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| altezza piante | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | LAI | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Coefficiente riflessione foglie | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Emissività foglie | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Resistenza stomatica [s/m] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Rugosità terreno | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Spessore terreno | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Tipologia terreno | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] |
| 20 | 0,002 | 0,0015 | 0,003 | 0,1 | 0,002 | 0,8 | 0,002 | 50 | 0,002 | Molto rugoso | 0,003 | 0,15 | 0,005 | DH01 | 0,002 |
| 22,5 | 0,002 | 0,5 | 0,003 | 0,125 | 0,002 | 0,825 | 0,002 | 70 | 0,002 | Rugoso | 0,002 | 0,16 | 0,005 | DH02 | 0,002 |
| 25 | 0,002 | 1 | 0,003 | 0,15 | 0,002 | 0,85 | 0,002 | 90 | 0,002 | Moderatamente rugoso | 0,002 | 0,17 | 0,004 | DH03 | 0,002 |
| 27,5 | 0,002 | 1,5 | 0,002 | 0,175 | 0,002 | 0,875 | 0,002 | 110 | 0,002 | Moderatamente liscio | 0,002 | 0,18 | 0,004 | DH04 | 0,002 |
| 30 | 0,002 | 2 | 0,002 | 0,2 | 0,002 | 0,9 | 0,002 | 130 | 0,002 | Liscio | 0,002 | 0,19 | 0,003 | DH05 | 0,003 |
| 32,5 | 0,002 | 2,5 | 0,001 | 0,225 | 0,002 | 0,925 | 0,002 | 150 | 0,002 | Molto liscio | 0,002 | 0,2 | 0,003 | DH06 | 0,003 |
| 35 | 0,002 | 3 | 0,001 | 0,25 | 0,002 | 0,95 | 0,002 | 170 | 0,002 | | | 0,21 | 0,003 | DH07 | 0,003 |
| 37,5 | 0,002 | 3,5 | 0,001 | 0,275 | 0,002 | 0,975 | 0,002 | 190 | 0,002 | | | 0,22 | 0,003 | DH08 | 0,002 |
| 40 | 0,002 | 4 | 0,001 | 0,3 | 0,002 | 1 | 0,002 | 210 | 0,002 | | | 0,23 | 0,003 | | |
| 42,5 | 0,002 | 4,5 | 0,001 | 0,325 | 0,002 | | | 230 | 0,002 | | | 0,24 | 0,002 | | |
| 45 | 0,002 | 5 | 0,001 | 0,35 | 0,002 | | | 250 | 0,002 | | | 0,25 | 0,002 | | |
| 47,5 | 0,002 | | | 0,375 | 0,002 | | | 270 | 0,002 | | | 0,26 | 0,002 | | |
| 50 | 0,002 | | | 0,4 | 0,002 | | | 290 | 0,002 | | | 0,27 | 0,002 | | |
| | | | | | | | | 300 | 0,002 | | | 0,28 | 0,002 | | |
| | | | | | | | | | | | | 0,29 | 0,002 | | |
| | | | | | | | | | | | | 0,3 | 0,003 | | |
| | | | | | | | | | | | | 0,31 | 0,002 | | |
| | | | | | | | | | | | | 0,32 | 0,002 | | |
| | | | | | | | | | | | | 0,33 | 0,002 | | |
| | | | | | | | | | | | | 0,34 | 0,003 | | |
| | | | | | | | | | | | | 0,35 | 0,003 | | |

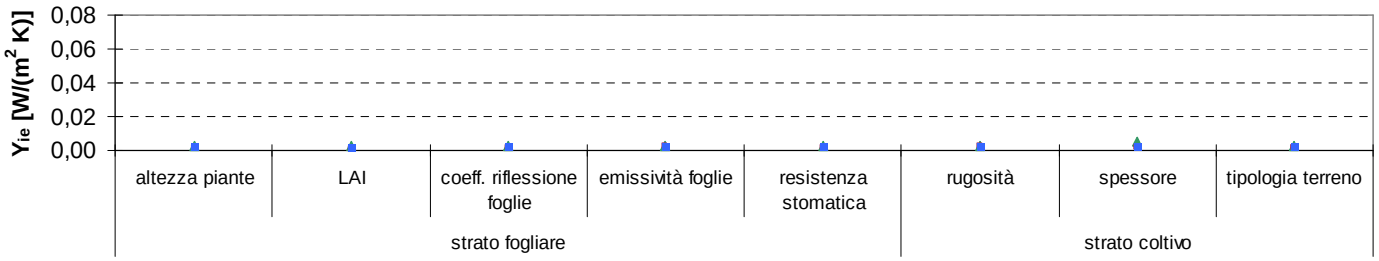



Figura 4.26. Variazione del valore di trasmittanza termica periodica $Y_{ie}$ al variare dei parametri di ingresso di un tetto rovescio estensivo. Spessore di isolante = 10 cm

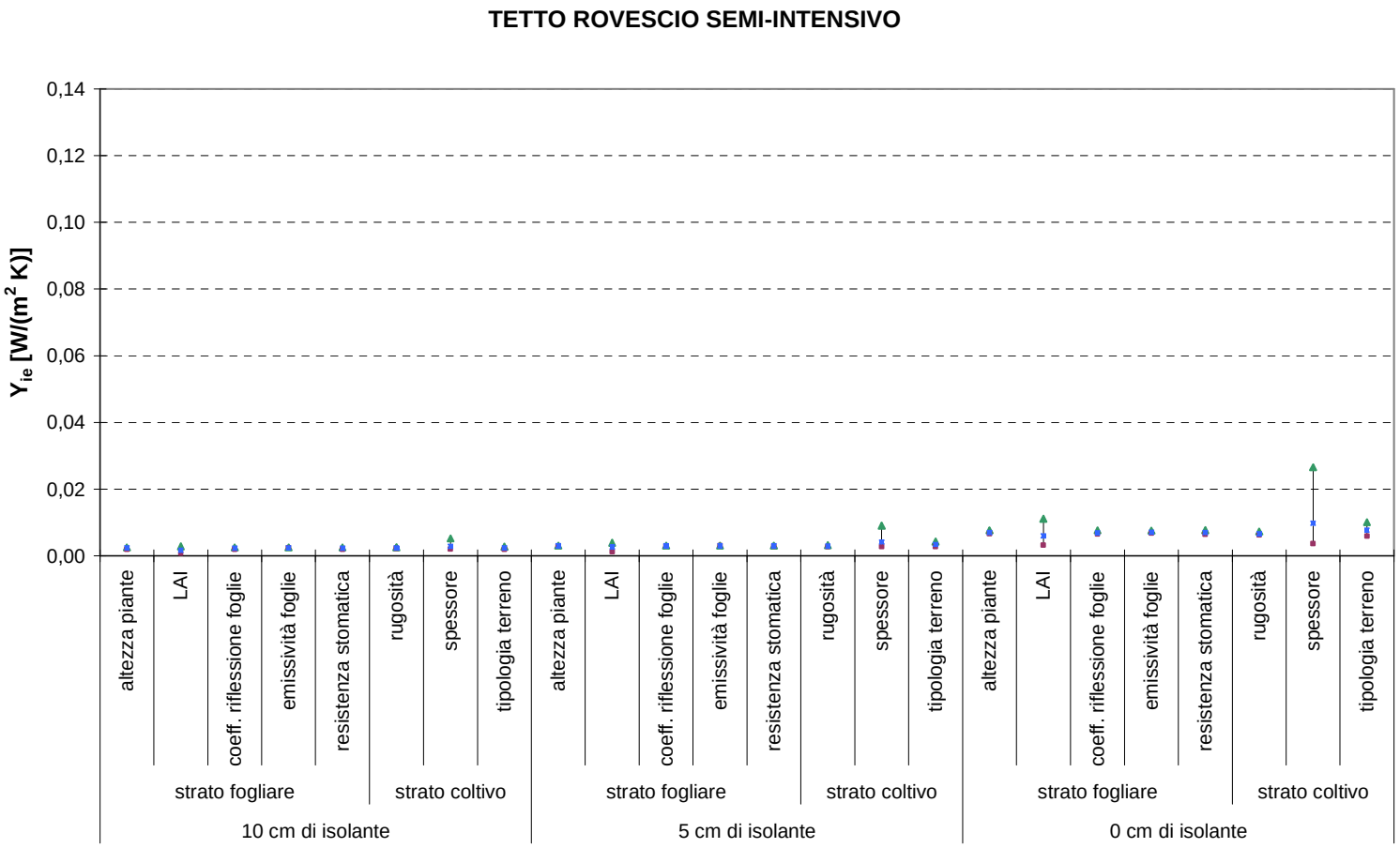



Figura 4.27. Variazione del valore di trasmittanza termica periodica $Y_{ie}$ al variare dei singoli parametri di ingresso degli strati di terreno e vegetazione di un tetto rovescio semi-intensivo.

## 4.6 Confronto tra metodi di calcolo

Al fine di valutare quanto si discostano i valori di trasmittanza termica periodica calcolati con metodo dettagliato descritto all'interno del paragrafo 4.5 rispetto a quelli calcolati con metodo semplificato secondo UNI EN ISO 13786 (sottoparagrafo 4.2.1), è stata analizzata la copertura verde di tipo estensivo di cui al paragrafo 4.5.

Le analisi parametriche sono state condotte facendo variare le proprietà del terreno che influenzano la trasmittanza termica periodica secondo entrambi i metodi di calcolo.

Inoltre, la forzante termica considerata per il metodo dettagliato è la temperatura esterna equivalente secondo la metodologia analizzata all'interno del sottoparagrafo 4.5.1 (equazione 4.31) mentre per il metodo semplificato è la temperatura dell'aria.

Tali proprietà sono esclusivamente lo spessore del terreno e la tipologia del terreno (conducibilità termica, calore specifico e densità del terreno).

Le analisi parametriche sono quindi state condotte al variare dello spessore dell'isolante termico.

Come si può notare dalla tabella 4.19 e dalla figura 4.28, in assenza di isolamento termico, la trasmittanza termica periodica calcolata con metodologia dettagliata è mediamente più elevata della stessa calcolata con metodo semplificato. Il valore medio di $Y_{ie}$ per coperture prive di isolamento termico calcolato attraverso il metodo della UNI EN ISO 13786 è infatti 0,014 W/(m$^2$ K) mentre secondo metodologia dettagliata è 0,062 W/(m$^2$ K). Inoltre, la metodologia dettagliata è maggiormente sensibile alla variazione delle proprietà del terreno prese in considerazione rispetto alla metodologia semplificata il cui valore di deviazione standard è molto basso (0,005 W/(m$^2$ K)). La deviazione standard dei valori calcolati con metodo dettagliato è invece 0,024 W/(m$^2$ K).

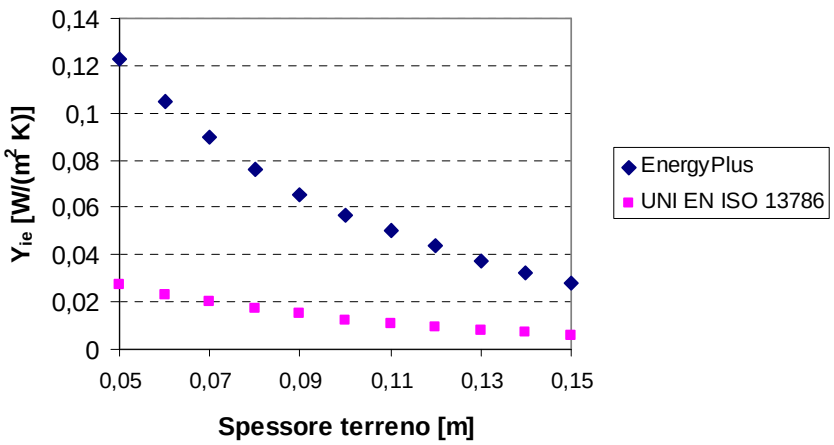
Al pari della copertura priva di isolamento termico, anche per le coperture che presentano strati di isolamento termico, le considerazioni sono analoghe. Anche in questi casi infatti il metodo semplificato sottostima il metodo dettagliato.

Tuttavia, maggiore è lo strato di isolamento termico e quindi maggiore è la resistenza termica della copertura, minore è la differenza tra i metodi e minore è la variazione della trasmittanza termica periodica al variare dei parametri di ingresso considerati.

In generale, la differenza tra i metodi è massima per coperture caratterizzate da resistenza termica bassa e tale differenza diventa importante se si considera che attraverso il metodo dettagliato la trasmittanza termica periodica può assumere valori maggiori dei valori imposti dall'attuale legislazione vigente in materia di risparmio energetico mentre attraverso il metodo semplificato sono sufficienti pochi centimetri di terreno per raggiungere valori molto bassi di trasmittanza termica periodica.

Tabella 4.19. Valori di $Y_{ie}$ al variare dei parametri di ingresso relativi allo strato di terreno per uno spessore di isolamento termico = 0 cm. Confronto tra metodo dettagliato (*EnergyPlus*) e metodo semplificato (UNI EN ISO 13786).

| **Spessore di isolante termico = 0 cm** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Metodo dettagliato - *EnergyPlus*** | | **Metodo semplificato – UNI EN ISO 13786** | | **Metodo dettagliato - *EnergyPlus*** | | **Metodo semplificato – UNI EN ISO 13786** | |
| Spessore terreno [m] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Spessore terreno [m] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Tipologia terreno | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Tipologia terreno | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] |
| 0,05 | 0,123 | 0,05 | 0,027 | DH01 | 0,057 | DH01 | 0,012 |
| 0,06 | 0,105 | 0,06 | 0,023 | DH02 | 0,051 | DH02 | 0,013 |
| 0,07 | 0,090 | 0,07 | 0,020 | DH03 | 0,053 | DH03 | 0,013 |
| 0,08 | 0,076 | 0,08 | 0,017 | DH04 | 0,048 | DH04 | 0,012 |
| 0,09 | 0,065 | 0,09 | 0,015 | DH05 | 0,066 | DH05 | 0,014 |
| 0,1 | 0,057 | 0,1 | 0,012 | DH06 | 0,066 | DH06 | 0,014 |
| 0,11 | 0,050 | 0,11 | 0,011 | DH07 | 0,071 | DH07 | 0,015 |
| 0,12 | 0,044 | 0,12 | 0,009 | DH08 | 0,063 | DH08 | 0,013 |
| 0,13 | 0,037 | 0,13 | 0,008 | | | | |
| 0,14 | 0,032 | 0,14 | 0,007 | | | | |
| 0,15 | 0,028 | 0,15 | 0,006 | | | | |



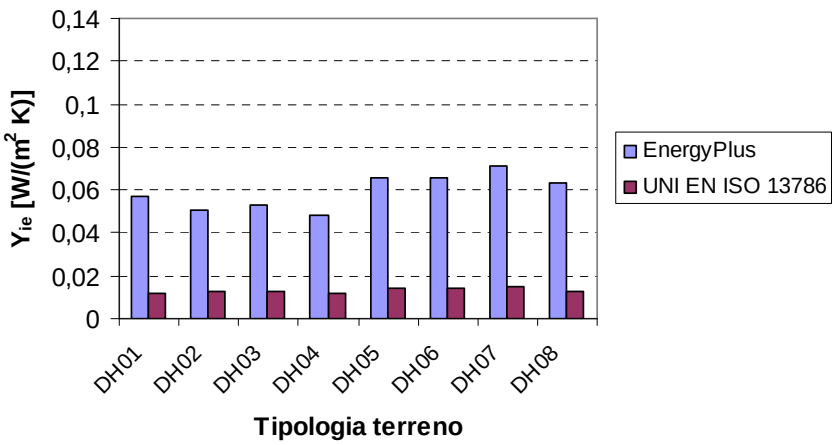
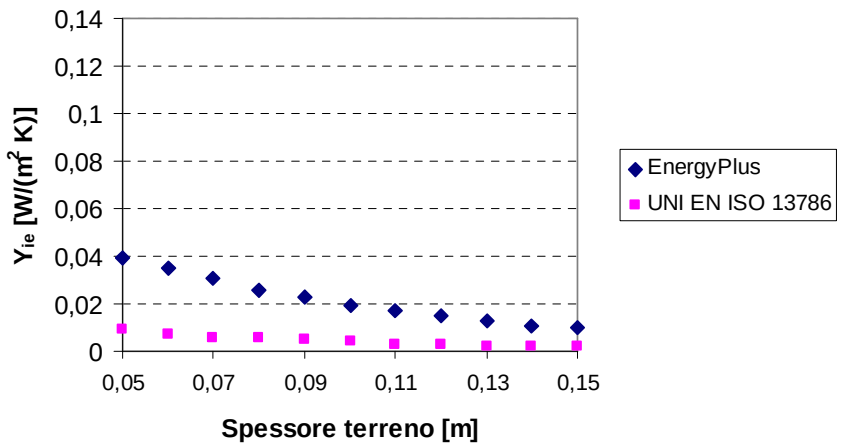




Figura 4.28. Variazione del valore di trasmittanza termica periodica $Y_{ie}$ al variare dei parametri di ingresso di un tetto rovescio estensivo. Spessore di isolante = 0 cm. Confronto tra metodo dettagliato (*EnergyPlus*) e metodo semplificato (UNI EN ISO 13786).

Tabella 4.20. Valori di $Y_{ie}$ al variare dei parametri di ingresso relativi allo strato di terreno per uno spessore di isolamento termico = 5 cm. Confronto tra metodo dettagliato (*EnergyPlus*) e metodo semplificato (UNI EN ISO 13786).

| **Spessore di isolante termico = 5 cm** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Metodo dettagliato - *EnergyPlus*** | | **Metodo semplificato – UNI EN ISO 13786** | | **Metodo dettagliato - *EnergyPlus*** | | **Metodo semplificato – UNI EN ISO 13786** | |
| Spessore terreno [m] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Spessore terreno [m] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Tipologia terreno | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Tipologia terreno | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] |
| 0,05 | 0,039 | 0,05 | 0,009 | DH01 | 0,019 | DH01 | 0,004 |
| 0,06 | 0,035 | 0,06 | 0,007 | DH02 | 0,018 | DH02 | 0,004 |
| 0,07 | 0,031 | 0,07 | 0,006 | DH03 | 0,018 | DH03 | 0,004 |
| 0,08 | 0,026 | 0,08 | 0,006 | DH04 | 0,017 | DH04 | 0,004 |
| 0,09 | 0,023 | 0,09 | 0,005 | DH05 | 0,023 | DH05 | 0,004 |
| 0,1 | 0,019 | 0,1 | 0,004 | DH06 | 0,023 | DH06 | 0,004 |
| 0,11 | 0,017 | 0,11 | 0,003 | DH07 | 0,025 | DH07 | 0,005 |
| 0,12 | 0,015 | 0,12 | 0,003 | DH08 | 0,022 | DH08 | 0,004 |
| 0,13 | 0,013 | 0,13 | 0,002 | | | | |
| 0,14 | 0,011 | 0,14 | 0,002 | | | | |
| 0,15 | 0,010 | 0,15 | 0,002 | | | | |



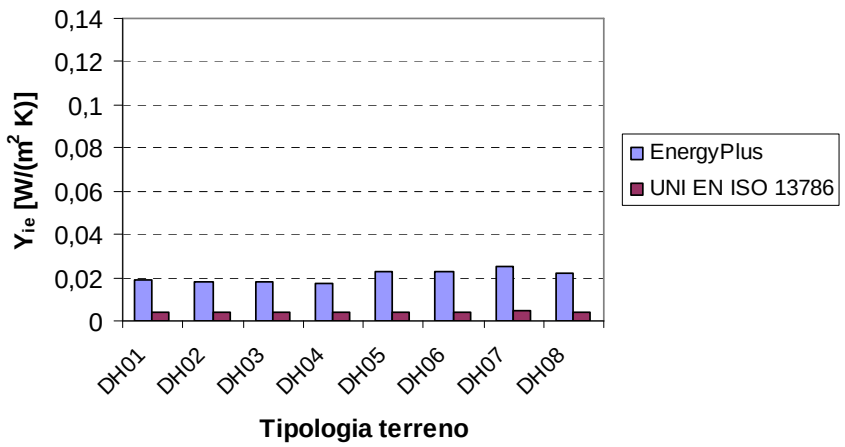
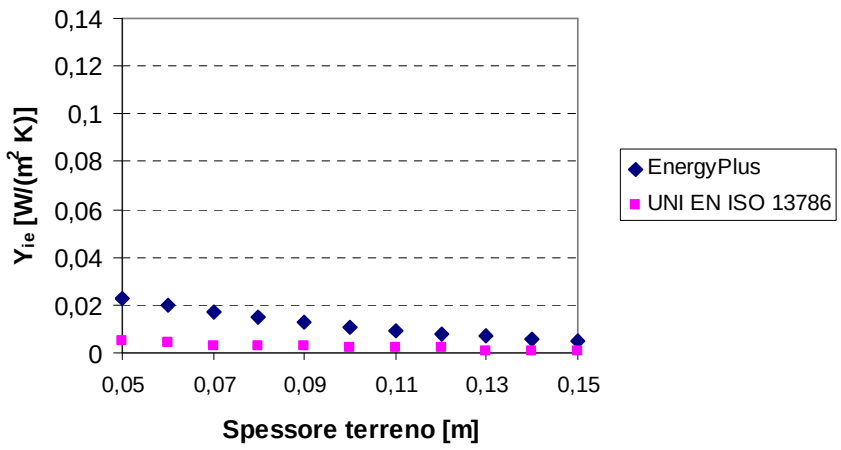




Figura 4.29. Variazione del valore di trasmittanza termica periodica $Y_{ie}$ al variare dei parametri di ingresso di un tetto rovescio estensivo. Spessore di isolante = 5 cm. Confronto tra metodo dettagliato (*EnergyPlus*) e metodo semplificato (UNI EN ISO 13786).

Tabella 4.21. Valori di $Y_{ie}$ al variare dei parametri di ingresso relativi allo strato di terreno per uno spessore di isolamento termico = 10 cm. Confronto tra metodo dettagliato (*EnergyPlus*) e metodo semplificato (UNI EN ISO 13786).

| **Spessore di isolante termico = 10 cm** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Metodo dettagliato - *EnergyPlus*** | | **Metodo semplificato – UNI EN ISO 13786** | | **Metodo dettagliato - *EnergyPlus*** | | **Metodo semplificato – UNI EN ISO 13786** | |
| Spessore terreno [m] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Spessore terreno [m] | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Tipologia terreno | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] | Tipologia terreno | $Y_{ie}$ [W/(m$^2$ K)] |
| 0,05 | 0,023 | 0,05 | 0,005 | DH01 | 0,011 | DH01 | 0,002 |
| 0,06 | 0,020 | 0,06 | 0,004 | DH02 | 0,010 | DH02 | 0,002 |
| 0,07 | 0,017 | 0,07 | 0,003 | DH03 | 0,010 | DH03 | 0,002 |
| 0,08 | 0,015 | 0,08 | 0,003 | DH04 | 0,009 | DH04 | 0,002 |
| 0,09 | 0,013 | 0,09 | 0,003 | DH05 | 0,013 | DH05 | 0,002 |
| 0,1 | 0,011 | 0,1 | 0,002 | DH06 | 0,013 | DH06 | 0,002 |
| 0,11 | 0,009 | 0,11 | 0,002 | DH07 | 0,014 | DH07 | 0,003 |
| 0,12 | 0,008 | 0,12 | 0,002 | DH08 | 0,012 | DH08 | 0,002 |
| 0,13 | 0,007 | 0,13 | 0,001 | | | | |
| 0,14 | 0,006 | 0,14 | 0,001 | | | | |
| 0,15 | 0,005 | 0,15 | 0,001 | | | | |



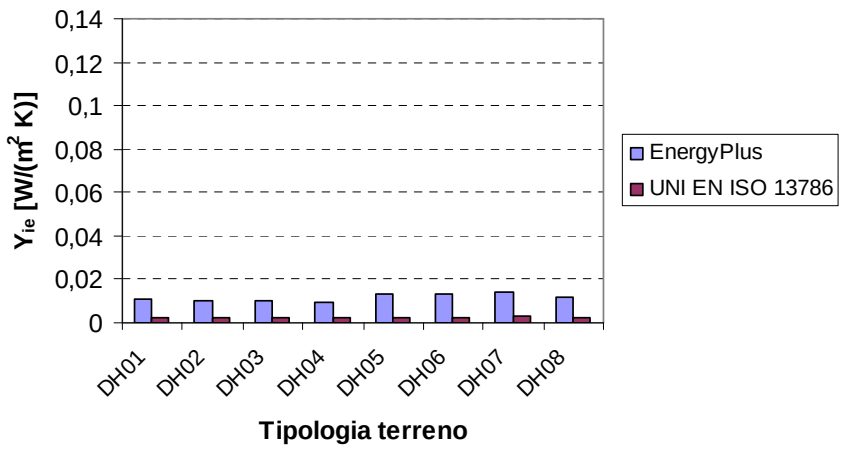




Figura 4.30. Variazione del valore di trasmittanza termica periodica $Y_{ie}$ al variare dei parametri di ingresso di un tetto rovescio estensivo. Spessore di isolante = 10 cm. Confronto tra metodo dettagliato (*EnergyPlus*) e metodo semplificato (UNI EN ISO 13786).

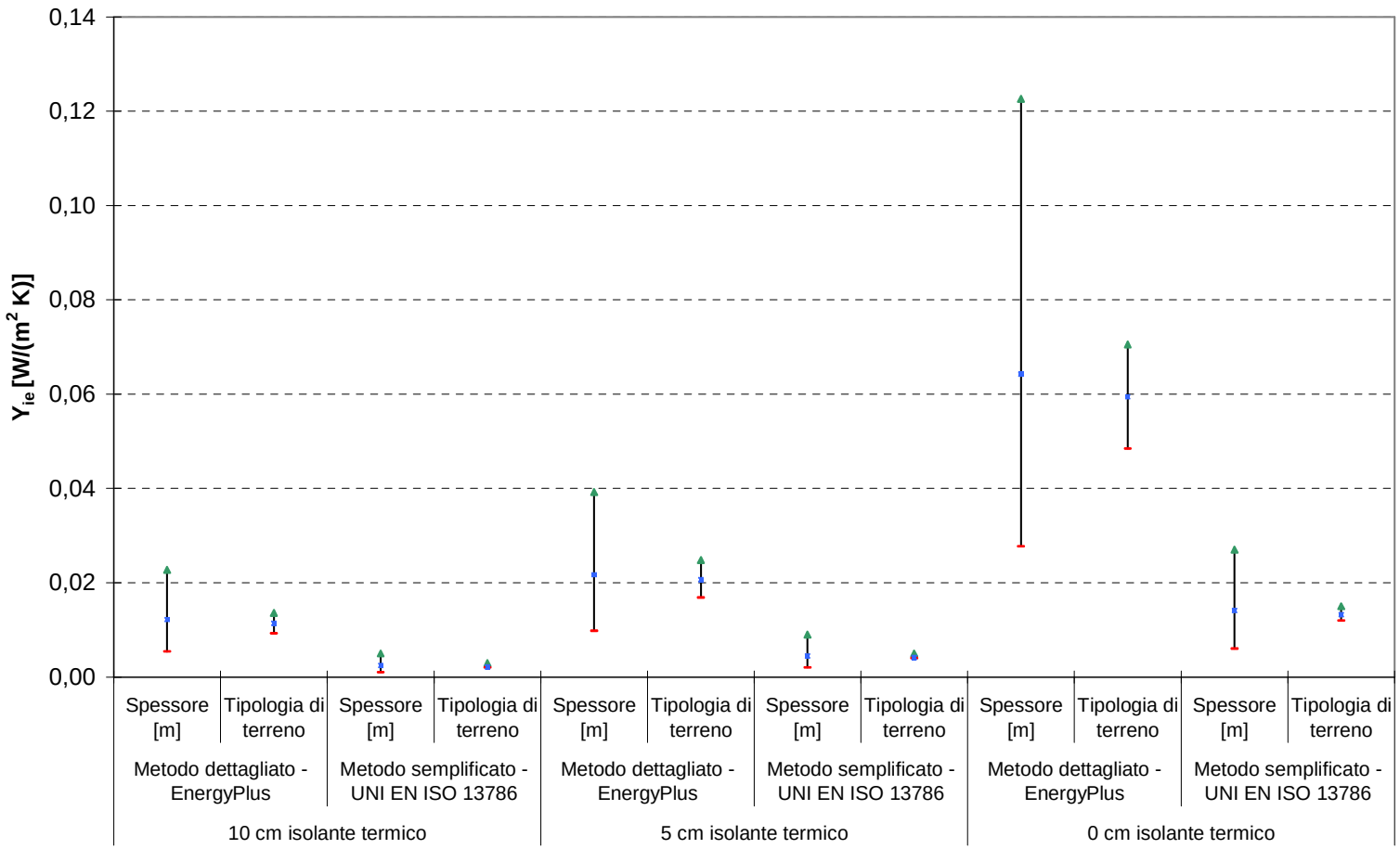



Figura 4.31. Variazione del valore di trasmittanza termica periodica $Y_{ie}$ al variare dei parametri di ingresso di un tetto rovescio semi-intensivo. Confronto tra metodo di calcolo dettagliato (*EnergyPlus*) e semplificato (UNI EN ISO 13786).

# 5. Conclusioni e sviluppi futuri

Nell'ottica di una progettazione dell'involucro edilizio volta alla riduzione del fabbisogno energetico sia in periodo estivo che invernale, alle latitudini caratteristiche del territorio italiano, l'involucro edilizio sarà caratterizzato in generale da componenti con elevata resistenza termica, da componenti vetrati capaci di sfruttare gli apporti gratuiti di origine solare in periodo invernale e limitarli in periodo estivo e da componenti opachi capaci di smorzare e attenuare le sollecitazioni termiche in periodo estivo.

Un'attenta progettazione deve avere a supporto metodologie di calcolo in grado di quantificare dal punto di vista energetico i vantaggi relativi all'utilizzo di determinate tecnologie.

In questo contesto si colloca l'attività di ricerca che ha avuto come obiettivo generale lo sviluppo e la validazione di modelli di calcolo della prestazione energetica dell'edificio e si è focalizzata in particolare sullo studio dei ponti termici e di tecnologie speciali di involucro quali serre solari e coperture verdi.

Per ciascun argomento analizzato, le fasi di lavoro sono state le seguenti:

- l'analisi della letteratura scientifica e della normativa tecnica e l'approfondimento di metodologie di calcolo caratterizzate da diversi livelli di complessità;
- l'analisi delle tecnologie impiegate attualmente nella progettazione;
- l'applicazione ad alcuni casi di studio di metodologie di calcolo complesse e il confronto con metodologie di calcolo semplificate;
- l'analisi parametrica per valutare l'effetto delle variabili di maggior interesse progettuale.

Si riportano, nel seguito, le considerazioni relative ai singoli argomenti di indagine.

*Modelli complessi e modelli semplificati*

Obiettivo di tale studio è stato il confronto tra metodologie di diversa complessità per il calcolo del fabbisogno di energia termica degli edifici in periodo invernale ed estivo.

Tale studio è stato condotto durante un periodo di attività presso la *Istanbul Technical University* in Turchia ad ha interessato in particolare il confronto tra i seguenti e modelli di calcolo del fabbisogno energetico degli edifici:

- il metodo di calcolo utilizzato in Italia, riportato nella specifica tecnica UNI/TS 11300-1 che fa riferimento al modello di calcolo mensile quasi stazionario descritto dalla norma europea UNI EN ISO 13790;
- il metodo di calcolo utilizzato in Turchia, specificato nella norma turca BEP-TR (*Building energy performance calculation methodology of Turkey*), che fa riferimento al modello di calcolo orario semplificato descritto dalla stessa UNI EN ISO 13790;
- il modello di simulazione dinamico implementato nel codice di calcolo *EnergyPlus*.

Dopo avere individuato le opzioni per la congruenza dei modelli e avere scomposto i modelli di calcolo nelle singole fasi di calcolo per di individuare dati di ingresso omogenei, di è analizzato un caso di studio, localizzato in due città caratterizzate da dati climatici differenti (Torino e Istanbul) al fine di indagarne il comportamento al variare delle condizioni al contorno.

Dal confronto tra metodi di calcolo emergono alcune considerazioni:

- in periodo invernale lo scostamento in termini di fabbisogno di energia termica per il riscaldamento tra i metodi UNI EN ISO 13790 e *EnergyPlus* è mediamente modesto (2÷15%);
- in periodo estivo il metodo orario semplificato approssima meglio il metodo dettagliato mentre il metodo mensile sovrastima fortemente i consumi;
- lo scostamento del metodo mensile nel periodo estivo può essere imputato al fatto che il fattore di utilizzazione non tiene adeguatamente in conto il *mismatch* tra apporti e dispersioni;
- lo scostamento del metodo orario semplificato è legato a una sottostima dell'inerzia dell'edificio. Il profilo di temperatura interna calcolato con il metodo orario semplificato durante i mesi di primavera/autunno ha un andamento che oscilla maggiormente seguendo il profilo di temperatura esterna rispetto a quello calcolato con il metodo dinamico.

Al fine di rendere i risultati dell'analisi generalizzabili, tale metodologia di indagine dovrà essere applicata ad ulteriori casi di studio caratterizzati da diversa destinazione d'uso, nonché da diverse caratteristiche prestazionali e morfologiche dell'involucro.

*Analisi dei ponti termici*

Obiettivo generale del seguente studio è stato l'implementazione della metodologia semplificata per il calcolo della trasmissione di calore attraverso i ponti termici mediante il calcolo della trasmittanza termica lineare ($\psi$) secondo la UNI EN ISO 10211.

Il lavoro ha previsto le seguenti fasi:

- la determinazione della trasmittanza termica lineare $\psi$ attraverso calcoli alle differenze finite secondo la norma UNI EN ISO 10211, al variare dei parametri progettuali significativi;
- il confronto tra tali valori di $\psi$ calcolati e i corrispondenti precalcolati secondo la norma UNI EN ISO 14683;
- la creazione di un atlante di ponti termici con l'obiettivo di fornire valori di $\psi$ per diverse tipologie di ponte termico e al variare dei parametri progettuali significativi;
- l'individuazione di equazioni di correlazione e applicazione dell'analisi di sensibilità al fine di quantificare il peso che la variazione dei parametri di ingresso ha sulla variazione di $\psi$;
- l'analisi dell'incidenza dei ponti termici sulle dispersioni termiche totali per trasmissione e sul fabbisogno di energia termica dell'edificio per alcuni casi di studio.

Lo studio che ha portato all'elaborazione dell'*Atlante nazionale dei ponti termici conforme alle UNI EN ISO 14683 e UNI EN ISO 10211* è stato condotto su 94 ponti termici per ognuno dei quali sono

state effettuate una media di 120 simulazioni al variare dei parametri progettuali maggiormente significativi.

Dai valori calcolati secondo la norma UNI EN ISO 10211 è possibile notare che tali valori di $\psi$ sono mediamente più bassi rispetto agli stessi valori standard (UNI EN ISO 14683) che sono introdotti per il calcolo del carico termico invernale di progetto.

Mediamente il calcolo semplificato sovrastima di 0,2 W/(m K) il valore di $\psi$ con differenze maggiori per quanto riguarda le giunzioni pareti – solai contro terra e parete – solaio rialzato. Per queste due tipologie di ponte termico, infatti, sono stati considerati quali parametri variabili, condizioni al contorno che influenzano notevolmente la $\psi$ (rispettivamente la dimensione caratteristica del pavimento *B*' e il fattore di correzione della temperatura $b_{tr}$) e che non sono prese in considerazione dalla UNI EN ISO 14683.

I risultati ottenuti dalle simulazioni per ogni ponte termico sono stati elaborati al fine di individuare equazioni di correlazione che permettessero di ricavare la $\psi$ in funzione dei parametri di ingresso e di svolgere un'analisi di sensibilità al fine di individuare, per ogni ponte termico, i parametri di ingresso la cui variazione maggiormente incide sulla variazione della $\psi$.

Al fine di individuare l'incidenza dei ponti termici, calcolati attraverso metodologia semplificata e dettagliata, sia sullo scambio termico per trasmissione che sul fabbisogno di energia termica per il riscaldamento, sono stati analizzati due casi di studio.

Da un'analisi di una villetta residenziale caratterizzata da diversi valori di trasmittanza termica di involucro e diverse tecnologie di isolamento termico (a cappotto e ad intercapedine) risulta evidente che l'incidenza dei ponti termici sul fabbisogno può raggiungere il 65% per Milano e l'85% per Roma con il calcolo secondo la UNI EN ISO 14683; il 35% per Milano e il 60% per Roma con il calcolo secondo la UNI EN ISO 10211.

Lo stesso ordine di grandezza in termini di incidenza dei ponti termini sul fabbisogno si è ricavato dal calcolo di una palazzina residenziale.

Tale calcolo è stato condotto al variare di alcuni parametri progettuali (spessore di muratura, conducibilità della muratura, spessore di solaio, spessore di isolamento termico) ed ha reso possibile, grazie all'analisi di sensibilità svolta sui ponti termici analizzati, individuare quale parametro progettuale risulta maggiormente influente sulla variazione della trasmittanza lineare dei singoli ponti termici e sulla variazione dello scambio termico per trasmissione e sul fabbisogno di energia termica in periodo invernale.

*Componenti di involucro speciali: le serre solari*

Obiettivo generale del presente studio è stato il confronto tra metodologie per il calcolo degli apporti solari entranti in ambiente climatizzato attraverso una serra solare. I metodi di calcolo analizzati sono rispettivamente il metodo semplificato della norma UNI EN ISO 13790, Appendice E e il metodo dettagliato implementato in *EnergyPlus*.

Al fine di confrontare i metodi, è stato analizzato un modello di serra solare addossata ad un locale climatizzato di cui sono state condotte alcune analisi parametriche al variare delle caratteristiche fisico-tecniche e morfologiche della serra stessa. Infine, allo scopo di analizzare lo scostamento tra i metodi in termini di fabbisogno di energia termica nel periodo invernale, è stato analizzato un edificio residenziale con una serra solare addossata il cui fabbisogno è stato calcolato attraverso i metodi previsti dalla UNI EN ISO 13790 (metodi orario semplificato e mensile quasi stazionario) e il metodo dinamico implementato in *EnergyPlus*.

Dai confronti in termini di apporti solari effettuati sul modello semplificato di serra solare addossata ad un locale climatizzato emenrge quanto segue:

- lo scostamento percentuale tra i metodi è in generale elevato ($\Delta Q_{ss}$ medio = 62%);
- lo scostamento percentuale tra i metodi risulta maggiore durante i mesi estivi (giugno in particolare) e minore durante i mesi invernali;
- il metodo semplificato approssima meglio il metodo dinamico in caso in cui la partizione tra ambiente climatizzato e serra solare sia caratterizzata da un rapporto tra area vetrata e area opaca ($A_w/A_p$) basso e qualora il coefficiente di assorbimento solare dell'involucro opaco sia basso (colore chiaro);
- la località, la tipologia di vetro e la trasmittanza termica della parete opaca di partizione non sono parametri che influenzano sensibilmente la differenza tra i metodi;
- dall'analisi dell'andamento mensile dei risultati risulta che il metodo semplificato sovrastima gli apporti solari diretti nei mesi estivi, mentre li sottostima durante i mesi invernali; d'altro canto sovrastima particolarmente nei mesi estivi gli apporti solari attraverso il componente opaco. Ne risulta che durante l'inverno gli effetti si compensano e la differenza tra il valore totale ($Q_{ss}$) risulta minore, mentre in estate gli effetti si sommano provocando una sovrastima dei valori totali.
- mediamente il metodo semplificato sovrastima gli apporti solari totali entranti in ambiente climatizzato attraverso la serra solare ($Q_{ss}$), sia in periodo estivo che in periodo invernale.

Dai confronti tra metodologie in termini di fabbisogno termico per riscaldamento calcolato su una palazzina residenziale si può affermare quanto segue:

- dal confronto tra metodi semplificati (orario semplificato e mensile quasi stazionario) con *EnergyPlus* emerge una differenza in termini di fabbisogno di energia termica per il mese di gennaio di circa il 10% se si considera la presenza di serra solare. Tale differenza risulta pertanto leggermente superiore rispetto alla differenza tra i metodi in assenza di serra solare (circa 3%);
- i metodi di calcolo semplificati sovrastimano gli apporti solari attraverso le serre solari. Il risparmio energetico ottenuto grazie alla presenza della serra solare è di circa il 31% secondo i metodi semplificati e del 25% secondo *EnergyPlus*;

- la differenza tra i metodi calcolata in termini di fabbisogno si attenua rispetto alla differenza tra i metodi calcolata in termini di apporti solari;
- non esiste una sostanziale differenza in termini di scostamento percentuale rispetto al metodo dettagliato tra il calcolo orario semplificato e mensile quasi stazionario. Il metodo orario semplificato permette però di ottenere informazioni maggiori ed interessanti relativamente alla serra solare come il profilo di temperatura interna. Inoltre permette la gestione oraria di dispositivi atti a massimizzare il guadagno solare in periodo invernale ed evitare il surriscaldamento in periodo estivo quali l'attivazione della ventilazione tra serra e ambiente climatizzato in funzione della differenza di temperatura tra ambienti, l'attivazione di dispositivi di schermatura solare, di chiusure oscuranti ecc.

Sviluppi futuri del presente lavoro prevedono il confronto in termini di fabbisogno anche per i restanti mesi di riscaldamento e per la stagione di raffrescamento per entrambe le località climatiche.

Durante la stagione di raffrescamento `è opportuno prevedere adeguati dispositivi per evitare il surriscaldamento degli ambienti e valutare quanto le metodologie semplificate permettano di tenere adeguatamente in conto di tali sistemi.

*Componenti di involucro speciali: i tetti verdi*

Obiettivo generale del presente studio è stata l'individuazione e il calcolo di un parametro termo-fisico rappresentativo della copertura verde.

Con l'entrata in vigore del D.P.R. 59/2009, si prescrive, al fine di garantire una adeguata inerzia termica del componente di involucro opaco, il rispetto della trasmittanza termica periodica ($Y_{ie}$) limite. Tale parametro, calcolato attraverso la norma UNI EN ISO 13786 per componenti tradizionali di involucro, non tiene adeguatamente in considerazione i fenomeni complessi relativi a tecnologie di involucro speciali quali coperture verdi.

Per questo motivo è stata analizzata una metodologia alternativa per il calcolo della trasmittanza termica periodica (Corrado e Paduos, 2009) a partire dal modello di calcolo implementato in *EnergyPlus*.

In particolare, a partire dal calcolo attraverso *EnergyPlus* del flusso termico scambiato dal componente per conduzione e dal calcolo della temperatura esterna equivalente quale forzante dinamica, per un giorno di progetto estivo, sono stati ricavati i valori di $Y_{ie}$ per alcuni casi di studio individuati.

Un'analisi di sensibilità è stata condotta al variare di alcune proprietà degli strati costituenti la copertura verde al fine di individuare i parametri la cui variazione incide maggiormente sulla variazione di $Y_{ie}$.

Infine un confronto tra i valori di $Y_{ie}$ calcolati attraverso il metodo di calcolo complesso individuato e i valori di $Y_{ie}$ calcolati attraverso il metodo semplificato contenuto nella norma UNI EN ISO 13786 è stato effettuato.

Lo studio è stato rivolto alla caratterizzazione di coperture verdi di tipo estensivo (caratterizzate da spessori di terreno e altezze dello strato fogliare limitati) e di tipo semi-intensivo (con spessori di terreno e altezze dello strato fogliare maggiori).

In generale risulta che:

- i parametri progettuali che maggiormente incidono sul valore della trasmittanza termica periodica di una copertura verde (sia estensiva che semi-intensiva) sono lo spessore del terreno e l'indice di area fogliare (LAI).
- tali parametri sono maggiormente significativi
  - quando la resistenza termica della copertura è bassa, ovvero quando lo spessore di isolamento termico è limitato o nullo. In particolare, al variare dello spessore di terreno, per una copertura priva di isolante termico, la trasmittanza termica periodica varia da 0,028 W/($m^2$ K) a 0,123 W/($m^2$ K). La variazione dell'indice di area fogliare induce invece uno scostamento di trasmittanza termica periodica da 0,028 W/($m^2$ K) a 0,083 W/($m^2$ K);
  - per coperture di tipo estensivo;
- coperture verdi di tipo semi-intensivo sono caratterizzate da una trasmittanza termica periodica media di inferiore rispetto alla trasmittanza termica periodica media della copertura estensiva (rispettivamente pari a 0,005 W/($m^2$ K) rispetto a 0,03 W/($m^2$ K));

Dal confronto tra metodologia dettagliata e semplificata emerge che:

- la trasmittanza termica periodica calcolata con metodologia dettagliata è mediamente più elevata della stessa calcolata con metodo semplificato;
- la metodologia dettagliata è maggiormente sensibile alla variazione delle proprietà del terreno prese in considerazione rispetto alla metodologia semplificata il cui valore di deviazione standard è molto basso (0,005 W/($m^2$ K)). La deviazione standard dei valori calcolati con metodo dettagliato è invece 0,024 W/($m^2$ K);
- maggiore è lo strato di isolamento termico e quindi maggiore è la resistenza termica della copertura, minore è la differenza tra i metodi e minore è la variazione della trasmittanza termica periodica al variare dei parametri di ingresso considerati.

Dal presente lavoro è emerso inoltre che, a fronte di molteplici metodologie complesse per il calcolo dello scambio termico attraverso coperture verdi, mancano invece banche dati relative alle proprietà termo-fisiche dei materiali caratteristici di tale tecnologia. In particolare mancano precise informazioni sulle proprietà dello strato fogliare e sulle proprietà di terreni adatti per coperture verdi individuate a livello nazionale. Tale studio evidenzia quindi l'importanza di proseguire gli studi volti alla determinazione delle proprietà degli strati costituenti le coperture verdi.

# Bibliografia

## Articoli su rivista e memorie in convegni


*Metodologie di calcolo della prestazione energetica degli edifici*

- V. Corrado, E. Fabrizio, *Assessment of building cooling energy need through a quasi-steady state model: Simplified correlation for gain-loss mismatch*, in "Energy and Buildings" n. 39-2007, pp. 569-579.
- I. Ballarini, A. Capozzoli, V. Corrado, *A validation of the quasi-steady state building energy model by a dynamic numerical analysis*, in CLIMA 2010, 10th Rehva World Congress "Sustainable Energy Use in Buildings", 9-12 May 2010, Antalya, 2010.
- I. Ballarini, A. Capozzoli, V. Corrado, *Validazione del metodo semplificato (UNI/TS 11300) mediante applicazione dell'analisi numerica in regime dinamico*, in Atti del Convegno AICARR "Prestazioni energetiche del sistema edificio-impianto: software per la diagnosi energetica ed il calcolo in regime invernale", Bologna 2009, pp. 175-186.

*Analisi dei ponti termici*

- T.G. Theodosiou, A.M. Papadopuolos, *The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double bick wall constructions*, in "Energy and Buildings" n. 40-2008, pp. 2083-2089.
- F. Cappelletti, V. Corrado, A Gasparella, A. Gorrino, *Detailed assessment of thermal bridges in highly insulated buildings*, in: CLIMA 2010, 10th Rehva World Congress "Sustainable Energy Use in Buildings", 9-12 May 2010, Antalya, 2010.
- A.E. Ben-Nakhi, *Minimizing thermal bridging through window systems in buildings of hot regions*, in "Applied Thermal Engineering" n. 22-2002, pp. 989–998.
- F. Cappelletti, A. Gasparella, Piercarlo Romagnoni, Paolo Baggio, *Analysis of the influence of installation thermal bridges on windows performance: The case of clay block walls*, in "Energy and Buildings" n. 43-2011, pp. 1435–1442.
- G. Evola, G. Margani, L. Marletta, *Energy and cost evaluation of thermal bridge correction in Mediterranean climate*, in "Energy and Buildings" n. 43-2011, pp. 2385–2393.
- K. Ghazi Wakili, H. Simmler, T. Frank, *Experimental and numerical thermal analysis of a balcony board with integrated glass fibre reinforced polymer GFRP elements*, in "Energy and Buildings" n. 39-2007, pp. 76–81.
- L. Zalewski , S. Lassue, D. Rousse, K. Boukhalfa, *Experimental and numerical characterization of thermal bridges in prefabricated building walls*, in "Energy Conversion and Management" n. 51-2010, pp. 2869–2877.
- F. Dèquè, F. Ollivier, J.J. Roux, *Effect of 2D modelling of thermal bridges on the energy performance of buildings. Numerical application on the Matisse apartment*, in "Energy and Buildings" m. 33-2000, pp. 583-587.

- Y. Gao, J.J. Roux, L.H. Zhao, Y. Jiang, *Dynamical building simulation: A low order model for thermal bridges losses*, in “Energy and Buildings” n. 40-2008, pp. 2236-2243.
- A.E. Ben-Nakhi, *Development of an integrated dynamic thermal bridging assessment environment*, in “Energy and Buildings” n. 35-2003, pp. 375-382.
- J. Kosny, E. Kossecka, *Multi-dimensional heat transfer through complex building envelope assemblies in hourly energy simulation programs*, in. “Energy and Buildings” n. 34-2002, pp. 445-454.
- K. Martin, A. Erkoreka, I. Flores, M. Odriozola, J.M. Sala, *Problems in the calculation of thermal bridges in dynamic conditions*, in “Energy and Buildings” n. 43-2011, pp. 529-535.
- S. Dilmac, A. Guner, F. Senkal, S. Kartal, *Simple method for calculation of heat loss through floor/beam-wall intersections according to ISO 9164*, in “Energy Conversion and Management” n. 48-2007, pp. 826–835.
- A. Ben Larbi, *Statistical modelling of heat transfer for thermal bridges of buildings*, in “Energy and Buildings” n. 37-2005, pp. 945-951.
- A. Capozzoli, V. Corrado, A. Gorrino, *Valutazione della trasmittanza termica lineare dei ponti termici: analisi di sensibilità per un caso di studio*, in Memorie del 66° Convegno ATI, Rende (Cosenza), 5-9 settembre 2011.
- A. Capozzoli, V. Corrado, A. Gorrino, *Analisi e validazione dei valori precalcolati di trasmittanza termica lineare per alcune tipologie di ponte termico*, in Memorie del 64° Convegno ATI, Montesilvano, 8-11 settembre 2009.
- F. Cappelletti, V. Corrado, A. Gasparella, A. Gorrino, *Analisi dettagliata di soluzioni correttive per ponti termici in edifici isolati*, in Memorie del 65° Convegno ATI, Cagliari, 13-17 settembre 2010.

<u>*Analisi statistica*</u>

- A. Capozzoli, H.E. Mechri, V. Corrado, *Impact of architectural design choices on building energy performance. Application of uncertainty and sensitivity techniques*, in Proceedings of “11th International IBPSA Conference”, Glasgow 2009.
- H.E. Mechri, A. Capozzoli, V. Corrado, *Use of the ANOVA approach for sensitive building energy design*, in “Applied Energy” n. 87-2010, pp. 3073–3083.

<u>*Serre solari*</u>

- J.J. Roux, C. Teodosiu, D. Covalet, R. Chareille, *Validation of a glazed space simulation model using full-scale experimental data*, in “Energy and Buildings” n. 36-2004, pp. 557-565.
- G.C. Bakos, *Electrical energy saving in a passive-solar-heated residence using a direct gain attached sunspace*, in“Energy and Buildings” n. 35-2003, pp. 147-151.
- G.C. Bakos, N.F. Tsagas, *Technology, thermal analysis and economic evaluation of a sunspace located in northern Greece*, in “Energy and Buildins” n. 31-2000, pp. 261-266.

- M. Wall, *Distribution of solar radiation in glazed spaces and adjacent buildings. A comparison of simulation programs*, in “Energy and Buildings” n. 26-1997, pp. 129-135.
- N. Cardinale, F. Ruggiero, *Energetic aspects of bioclimatic buildings in the Mediterranean area: a comparison between two different computation methods*, in “Energy and Buildings” n. 31-2000, pp. 55-63.
- A. Voeltzel, F.R. Carrìè, G. Guarracino, *Thermal and ventilation modelling of large highly-glazed spaces*, in “Energy and Buildings” n. 33-2001, pp. 121-132.
- A. Trombe, L. Serres, M. Moisson, *Solar radiation modelling in a complex enclosure*, in “Solar Energy” n. 67-1999, pp. 297-307.
- M. Tan, *Opposite sunspaces passive solar air heating system*, in “Solar Energy” n. 60-1997, pp. 127-134.
- P.G. Loutzenhiser, H. Manz, C. Felsmann, P.A. Strachan, T. Frank, G.M. Maxwell, *Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation*, in “Solar Energy” n. 81-2007, pp. 254-267.
- P.G. Loutzenhiser, H. Manz, S. Moosberger, G.M. Maxwell, *An empirical validation of window solar gain models and the associated interactions*, in “International Journal of Thermal Sciences” n. 48-2009, pp. 85-95.
- P.G. Loutzenhiser, H. Manz, C. Felsmann, P.A. Strachan, G.M. Maxwell, *An empirical validation of modeling solar gain through a glazing unit with external and internal shading screens*, in “Applied Thermal Engineering” n. 27-2007, pp. 528-538.
- J.M. Mottard, A. Fissore, *Thermal simulation of an attached sunspaces and its experimental validation*, in “Solar Energy” n. 81-2007, pp. 305-315.
- G. Oliveti, M. De Simone, S. Ruffolo, *Evaluation of the absorption coefficient for solar radiation in sunspaces and windowed rooms*, in “Solar Energy” n. 82-2008, pp. 212-219.
- J.M. Baleynaud, M. Petit, A. Trombe, *Attached sunspaces – sensitivity factors*, in “Solar Energy” n. 46-1991, pp. 149-166.
- G. Mihalakakou, A. Ferrante, *Energy conservation and potential of a sunspace: sensitivity analysis*, in “Energy Conversion & Management” n. 41-2000, pp. 1247-1264.
- E. Shaviv, *The performance of a passive solar house with window sunspace systems*, in “Energy and Buildings” n. 7-1984, pp. 315-334.
- G. Mihalakakou, *On the use of sunspace for space heating/cooling in Europe*, in “Renewable Energy” n. 26-2002, pp. 415-429.
- W. Esposti, I. Meroni, F. Scamoni, P. Tirloni, C. Pollastro, R. Lacci, *Experimental analysis of the energy performance o fan attached sunspace*, in “Energy and Buildings” n. 14-1990, pp. 221-224.
- K. Chatziangelidis, D. Bouris, *Calculation of the distribution of incoming solar radiation in enclosures*, in “Applied Thermal Engineering” n. 29-2009, pp. 1096-1105.

- C. Torra, J.A. Cusidò, J. Puigdomènech, *Some experiences on design and calculation of sunspaces in Mediterranean climates*, in “Solar & Wind Technology” Vol. 5 n. 4-1988, pp. 365-378.
- M.S. Bhandari, N.K. Bansal, *Solar heat gain factors and heat loss coefficient for passive heating concepts*, in “Solar Energy” Vol. 53 n. 2-1994, pp. 199-208.
- S. Hassid, *A linear model for passive solar evaluation*, in “Solar Energy” Vol. 37 n. 21986, pp. 165-174.
- A.C. Oliveira, E. De Oliveira Fernandes, *A new simplified method for evaluating the thermal behaviour of direct gain passive solar buildings*, in “Solar Energy” Vol. 48 n. 4-1992, pp. 227-233.
- G. Oliveti, N. Arcuri, R. Bruno, M. De Simone, *An accurate calculation model of solar heat gain through glazed surfaces*, in “Energy and Buildings” n. 43-2011, pp. 269-274.
- G. Oliveti, N. Arcuri, S. Ruffolo, *Experimental investigation on thermal radiation Exchange of horizontal outdoor surfaces*, in “Building and Environment” n. 38-2003, pp. 83-89.
- G. Oliveti, N. Arcuri, M De Simone, R. Bruno, *Solar heat gains and operative temperature in attached sunspaces*, in “Renewable Energy” n. 39-2012, pp. 241-249.
- R. Colombo, A. Landabaso, A. Sevilla, *Passive solar architecture for mediterranean area*, Inst. For Systems Engineering and Informatics, Joint Research Centre, Comm. Of the European Communities, Brussels, 1994.
- V. Corrado, V. Serra, *Analysis of solar radiation and implementation of a calculation model for energy characterization of fenestration systems*, in: Proceedings of CLIMA 2000, Brussels, 30th August – 2nd September 1997.
- G. Oliveti , N. Arcuri , R. Bruno , M. De Simone , *Valutazione del coefficiente correttivo Fw della trasmittanza solare* in. Atti del convegno "AIGE 2009", Parma, 4-5 Giugno, 2009, Università degli Studi di Parma:Parma, 2009, Vol. Atti su CD, pp. -
- G. Oliveti , N. Arcuri , R. Bruno , M. De Simone , *Una procedura di calcolo per la valutazione degli apporti solari attraverso gli elementi finestrati e confronti con la UNI/TS 11300-1*.in Atti del convegno "65° Congresso Nazionale ATI", Domus de Maria (Cagliari), 13-17 Settembre, 2010, Sigma Schede Sarda srl:Cagliari, 2010, Vol. Atti su CD, pp. –
- G. Oliveti , N. Arcuri , M. De Simone , R. Bruno , *Impiego delle serre solari nella riqualificazione energetica degli edifici*.in Atti del convegno "66° Congresso nazionale ATI", Rende (CS), 5-9 Settembre, 2011, 2011, Vol. Atti su CD, pp. –
- G. Oliveti , N. Arcuri , S. Ruffolo , F, Guccione , *Apporti energetici e valutazioni economiche di sistemi vetrati nella climatizzazione degli edifici*. in Atti del convegno "58° Congresso Nazionale ATI", San Martino di Castrozza - Padova, 9 - 12 Settembre, 2003, SGE Servizi Grafici Editoriali:Padova, 2003, Vol. II, pp. 1515-1529.
- S.P. Corgnati; V. Corrado; C. Maga, *Metodi di calcolo e strategie di utilizzo delle serre*. In: 44° Convegno Internazionale AICARR 2004, Marzo 2004, p. 979-994.

- S.P. Corgnati; V. Corrado, *Strategie per il controllo climatico di una serra*. In: Convegno AICARR, p. 246-261.

<u>*Coperture verdi*</u>

- D.D. Baldocchi, B.B. Hicks, P. Camara, *A canopy stomatal resistance model for gaseous deposition to vegetated surfaces*, in "Atmospheric Environment" vol. 21 n. 1-1987, pp. 91-101.
- D.J. Sailor, *A green roof model for building energy simulation programs*, in "Energy and Buildings", 40-2008, pp. 1466-1478.
- A. Okeil, *A holistic approach to energy efficient building forms*, in "Energy and Buildings" n. 42-2010, pp. 1437-1444.
- A. Niachou, K. Papakonstantinou, M. Santamouris, A. Tsangrassoulis, G. Mihalakakou, *Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance*, in "Energy and Buildings" n. 33-2001, pp. 719-729.
- E. Palomo Del Barrio, *Analysis of the green roofs cooling potential in buildings*, in "Energy and Buildings" n. 27-1998, pp. 179-193.
- C.Y. Jim, H. He, *Coupling heat flux dynamics with meteorological conditions in the green roof ecosystem*, in "Ecological Engineering" n. 36-2010, pp. 1052-1063.
- E. Alexandri, P. Jones, *Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: Comparison with experimental results*, in "Building and Environment" n. 42-2007, pp. 2835-2849.
- R.M. Lazzarin, F. Castellotti, F. Busato, *Experimental measurements and numerical modelling of a green roof*, in "Energy and Buildings" n. 37-2005, pp. 1260-1267.
- R. Rashid, M.H.B. Ahmed, M.S. Khan, *Green roof and its impact on urban environmental sustainability: the case in Bangladesh*, in "World Journal of Management" vol. 2 n. 2-2010, pp. 59-69.
- R. Fioretti, A. Palla, L.G. Lanza, P. Principi, *Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate*, in "Building and Environment" n. 45-2010, pp. 1890-1904.
- H.F. Castleton, V. Stovin, S.B.M. Beck, J.B. Davison, *Green roofs: building energy savings and the potential for retrofit*, in "Energy and Buildings" n. 42-2010, pp. 1582-1591.
- N.H. Wong, Y. Chen, C.L. Ong, A. Sia, *Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment*, in "Building and Environment" n. 38-2003, pp. 261-270.
- G. Rana, N. Karerji, *Measurement and estimation of actual avepotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review*, in "European Journal of Agronomy" n. 13-2000, pp. 125-153.
- A. Spala, H.S. Bagiorgas, M.N. Assimakopoulos, J. Kalavrouziotis, D. Matthopoulos, G. Mihalakakou, *On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece*, in "Renewable Energy" n. 33-2008, pp. 173-177.
- D. Pearlmutter, S. Rosenfeld, *Performance analysis of a simple roof cooling system with irrigated soil and shading alternatives*, in "Energy and Buildings" n. 40-2008, pp. 855-864.

- R. Kumar, S.C. Kaushik, *Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings*, in “Building and Environment” n. 40-2005, pp. 1505-1511.
- S. Onmura, M. Matsumoto, S. Hokoi, *Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens*, in “Energy and Buildings” n. 33-2001, pp. 653-666.
- T. G. Theodosiou, *Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique*, in “Energy and Buildings”, 35-2003, pp. 909-917.
- H Takebayashi, M. Moriyama, *Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island*, in “Building and Environment” n. 42-2007, pp. 2971-2979.
- E. Eumorfopoulou, D. Aravantinos, *The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece*, in “Energy and Buildings” n. 27-1998, pp. 29-36.
- N.H. Wong, D.K.W. Cheong, H. Yan, J. Soh, C.L. Ong, A. Sia, *The effects of rooftop garden on energy consumption of a commenrcial cuilbing in Singapore*, in “Energy and Buildings” n. 35-2003, pp. 353-364.
- C. Feng, Q. Meng, Y. Zhang, *Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs*, in “Energy and Buildings” n. 42-2010, pp. 959-965.
- D.J. Sailor, D. Hutchinson, L. Bokovoy, *Thermal property measurements for ecoroof soils common in the western U.S.*, in “Energy and Buildings” n. 40-2008, pp. 1246-1251.
- A. Palla, I. Gnecco, L.G. Lanza, *Unsaturated 2D modelling of subsurface water flow in the coarse-grained porous matrix of a garden roof*, in “Journal of Hydrology” n. 379-2009, pp. 193-204.
- T. Emilsson, *Vegetation development on extensive vegetated green roofs: influence of substrate composition, establishment method and species mix*, in “Ecological Engineering” n. 33-2008, pp. 265-277.
- Milbank N.O. Harrington-Lynn J, *Thermal response and admittance procedure*, in “Building Services Engineering” n. 42-1974, pp. 38-51.
- V. Corrado; S. Paduos, *Building envelope analysis in summer: dynamic thermal parameters and calculation methods*. In: BAYAZIT, MANIOĞLU, ORAL & YILMAZ. Energy Efficiency and New Approaches. Proceedings of the 4th International Building Physics Conference, Istanbul, 15-18 Giugno 2009, ISTANBUL: Istanbul Technical University (Turchia), p. 151-158, ISBN: 978-975-561-350-5.
- V. Corrado; S. Paduos, *Il progetto termico dinamico dell’involucro opaco: componenti tradizionali ed innovativi a confronto*. In: Atti del 65° Congresso Nazionale ATI. Chia Laguna Resort, Domus De Maria (CA), 13-17 Settembre 2010, Eurografica s.r.l., 09.192, ISBN 978-88-90411-63-2.
- P.J. Sellers, Y. Mintz, Y.C. Sud, A. Dalcher, *A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models*. in “Journal of Atmospheric Science” n. 43(6)- 1986, pp. 505–532.

## Monografie


*Analisi dei ponti termici*

- Trisco & Cobru86. *Computer program to calculate 2D and 3D steady state heat transfer in rectangular objects*, PHYSIBEL, 2007.
- THERM 5.2, *NFRC Simulation Manual*, Lawrence Berkeley National Laboratory, July 2006.
- Office fédéral de l'énergie OFEN, *Catalogue des ponts thermiques*, 2003.
- CESTEC SPA (Centro per lo sviluppo tecnologico,l'energia e la competitività, ANCE Lombardia (Associazione regionale dei costruttori edili lombardi), Politecnico di Milano, *Abaco dei ponti termici*, 2011.
- Minnesota department of commerce – Energy division, LHB Engineers & Architects *Catalog of thermal bridges in commercial and multi-family construction*, 2000.
- M Citterio, M. Cocco, H. Erhorn-Kluttig, *Thermal bridges in the EBPD context: overview on MS approaches in regulations*, in: ASIEPI Information Paper, 2008.
- A. Capozzoli, V. Corrado, A. Gorrino, P. Soma, *Atlante nazionale dei ponti termici. Conforme alle UNI EN ISO 14683 e UNI EN ISO 10211*, Edizioni EDILCLIMA, 2011.

*Analisi statistica*

- F. Pellerey, *Elementi di statistica per le applicazioni*, Celid, Torino 1998.
- SimLab 2.2, *Reference Manual*, 2009 [http://simlab.jrc.ec.europa.eu/].
- Fang S, George Z, et al. *Improved generalized Fourier amplitude sensitivity test for model assessment*. Stat Comput 2003;13:221–6.
- Saltelli A, Chan K, Scott EM. *Sensitivity analysis: gauging the worth of scientific models*. 1st ed. England: John Wiley & Sons; 2000.

*Serre solari*

- L. Schibuola, L. Cecchinato, *Sistemi solari attivi e passivi*, Società Editrice Esculapio, Bologna, 2005.
- P. Chauvel, J.R. Millet , *L'appreciation des caracteristiques des protections solaires des baies. I-Modelisation thermo-optique et exigences de confort*, CSTB, Marne-La-Vallee, 1991.

*Coperture verdi*

- S. Frankenstein, G. Koenig, *FASST Vegetation Models*, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory (ERDC/CRREL), Technical Report TR-04-25, 2004.
- S. Frankenstein, G. Koenig, *Fast all-season soil strength (FASST)*, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory (ERDC/CRREL), Special Report SR-04-01, 2004.

- R.E. Dickinson, A. Henderson-Sellers, P.J. Kennedy, M.F. Wilson, *Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR community climate model*. NCAR Technical Note, TN-275+STR, 1986.


## Legislazione


- Direttiva 2002/91 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16 dicembre 2002 sul rendimento energetico nell'edilizia, pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale delle Comunità europee n. L1 del 4 gennaio 2003.
- Direttiva 2010/31 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione), pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale dell'Unione europea n. L153 del 18 giugno 2010.
- Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192 "Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia", pubblicato sul Supplemento ordinario n. 158/L alla Gazzetta Ufficiale n. 222 del 23 settembre 2005.
- Decreto Legislativo 29 dicembre 2006, n. 311 "Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia", pubblicato sul Supplemento ordinario n. 26 alla Gazzetta Ufficiale n. 26 del 1° febbraio 2007.
- D.P.R. 2 aprile 2009 n. 59 "Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia", pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 132 del 10 giugno 2009.
- Decreto Ministeriale 26 giugno 2009 "Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici", pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 158 del 10 luglio 2009.
- Legge Regionale n.13 del 28 maggio 2007, "Disposizioni in materia di rendimento energetico nell'edilizia".
- D.G.R. n. 45-11967, "Disposizioni in materia di rendimento energetico nell'edilizia". Disposizioni attuative in materia di impianti solari termici, impianti da fonti rinnovabili e serre solari ai sensi dell'articolo 21, comma 1, lettere g) e p)".


## Normativa tecnica


- UNI/TS 11300-1. Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale. Maggio 2008.
- UNI EN ISO 13790. Prestazione energetica degli edifici. Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento. Giugno 2008.
- BEP-TR. Building energy performance calculation methodology of Turkey. Gazzetta ufficiale.
- UNI EN ISO 6946. Componenti edilizi ed elementi per l'edilizia. Resistenza termica e trasmittanza termica. Metodo di calcolo. Luglio 2008.

- UNI EN ISO 13370. Prestazione termica degli edifici. Trasferimento di calore attraverso il terreno. Metodi di calcolo. Maggio 2008.
- UNI EN ISO 10077-1. Prestazione termica di finestre, porte e chiusure. Calcolo della trasmittanza termica. Parte 1: Generalità. Marzo 2007.
- UNI EN ISO 13363-1. Dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate - Calcolo della trasmittanza solare e luminosa - Parte 1: Metodo semplificato. Dicembre 2008.
- UNI EN ISO 14683, Ponti termici in edilizia. Coefficiente di trasmissione termica lineica. Metodi semplificati e valori di riferimento. Maggio 2008.
- UNI EN ISO 10211, Ponti termici in edilizia. Flussi termici e temperature superficiali. Calcoli dettagliati. Luglio 2008.
- UNI EN ISO 13789. Prestazione termica degli edifici. Coefficiente di trasferimento del calore per trasmissione e ventilazione. Metodo di calcolo. Maggio 2008.
- UNI 7357, Calcolo del fabbisogno termico per il riscaldamento di edifici. Dicembre 1974. Foglio di aggiornamento 3. Maggio 1989.
- UNI EN ISO 13788, Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia - Temperatura superficiale interna per evitare l umidità superficiale critica e condensazione interstiziale - Metodo di calcolo. Giugno 2003.
- UNI 10349. Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici. Aprile 1994.
- UNI 10351. Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore. Marzo 1994.
- UNI 10355. Murature e solai. Valori della resistenza termica e metodo di calcolo. Maggio 1994.
- UNI EN ISO 13786. Prestazione termica dei componenti per l'edilizia. Caratteristiche termiche dinamiche. Metodi di calcolo. Maggio 2008.
- UNI 11235. Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde. Maggio 2007.


**Siti web**


- http://www.designbuilder.co.uk/content/view/43/64/
- http://simlab.jrc.ec.europa.eu/
- http://www.spss.com/software/statistics/
- http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/
- http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data.cfm

# Nomenclatura

| Simbolo | Grandezza | Unità di misura |
|---|---|---|
| $A$ | area | [m$^2$] |
| $b$ | fattore di correzione dello scambio termico | [-] |
| $B'$ | dimensione caratteristica del pavimento | [m] |
| $c$ | calore specifico | [J/(kg K)] |
| $C_m$ | capacità termica | [kJ/K] |
| $F$ | fattore | [-] |
| $f$ | frazione | [-] |
| $g$ | trasmittanza di energia solare totale | [-] |
| $H$ | coefficiente di scambio termico | [W/K] |
| $h$ | coefficiente di scambio termico liminare | [W/(m$^2$K)] |
| $I$ | irradianza | [W/m$^2$] |
| $l$ | lunghezza | [m] |
| $L_{2D}$ | coefficiente di accoppiamento termico bidimensionale | [W/(m K)] |
| $L_{3D}$ | coefficiente di accoppiamento termico tridimensionale | [W/K] |
| $L_{mn}$ | conduttanza termica periodica | [W/K] |
| $\dot{m}$ | portata in massa | [kg/s] |
| $Q$ | energia termica | [J], [Wh] |
| $q$ | flusso termico areico | [W/m$^2$] |
| $R$ | resistenza termica, frazione di radiazione solare | [(m$^2$ K)/W], [-] |
| $t$ | tempo | [s], [h] |
| $U$ | trasmittanza termica | [W/(m$^2$ K)] |
| $V$ | volume | [m$^3$] |
| $\dot{V}$ , $\dot{q}$ | portata volumica | [m$^3$/s] |
| $Y_{ie}$,$Y_{mn}$ | trasmittanza termica periodica | [W/(m$^2$ K)] |
| $\alpha$ | coefficiente di assorbimento solare | [-] |
| $\gamma$ | rapporto apporti/dispersioni | [-] |
| $\eta$ | fattore di utilizzazione | [-] |
| $\theta$ | temperatura | [°C], [K] |
| $\kappa$ | capacità termica areica | [kJ/(m$^2$K)] |
| $\lambda$ | conducibilità termica | [W/(m K)] |
| $\Phi$ | flusso termico | [W] |

| | | |
|---|---|---|
| $\chi$ | trasmittanza termica puntuale | [W/K] |
| $\psi$ | trasmittanza termica lineare | [W/(m K)] |
| $\rho$ | massa volumica | [kg/m$^3$] |
| $\tau$ | costante di tempo termica, coefficiente di trasmissione solare dei vetri | [h] |
| **Pedici** | | |
| adj | corretto | |
| ae | aria esterna | |
| air,ai | aria interna | |
| C | raffrescamento | |
| cond | conduttivo | |
| conv,c,ve | convettivo, convezione | |
| corr | corrente, corretto | |
| dif | diffusa | |
| dir | diretta | |
| e | esterno, involucro della serra | |
| eq | equivalente | |
| F | telaio | |
| f | fittizia, netta | |
| fin | aggetto verticale | |
| g,gl | vetro | |
| gn | apporti | |
| gr | terreno | |
| H | riscaldamento | |
| hor | orizzonte | |
| ht | scambio termico | |
| int | interno | |
| int,IG | apporti interni | |
| lim | limite | |
| ls | dispersione termica | |
| m | massa | |
| mn, m | medio | |
| n | netto | |
| n, normal | normale | |
| nd | fabbisogno netto | |
| ob | ostruzione | |

| | |
|---|---|
| oi | totale interno |
| op,c,p | opaco |
| r | radiazione infrarossa |
| s | superficie |
| sd | solari diretti |
| se | superficiale esterno |
| set | regolazione |
| sh | ombreggiatura |
| shut | chiusura oscurante |
| si | superficiale interno, solari indiretti |
| sk | volta celeste |
| sol | solare |
| ss | solari totali (da serra solare) |
| sup | aria immessa |
| syst | impianto |
| t,τ | tempo |
| tr | trasmissione termica |
| u | non climatizzato |
| ve | ventilazione |
| w | serramento |

# Ringraziamenti

Al termine dei tre anni di dottorato vorrei ringraziare coloro che più di tutti hanno reso possibile la stesura del presente lavoro.

Ringrazio il prof. Vincenzo Corrado per aver fornito un costante stimolo all'attività di ricerca e per aver contribuito alla mia crescita professionale.
Ringrazio la prof. Zerrin Yilmaz per avermi accolta alla Istanbul Technical University di Istanbul.

Un ringraziamento particolare a Franco Soma, Paola Soma e a tutti i dipendenti e collaboratori di Edilclima S.r.l. con cui si è svolta un'intensa e stimolante collaborazione grazie alla loro disponibilità, curiosità e attenzione costante rivolta all'attività di ricerca.

Ringrazio quindi Alfonso per essermi stato così vicino in questi tre anni, per avere avuto sempre fiducia nelle mie capacità e per avere, con passione invidiabile, indagato insieme a me ogni argomento di ricerca.

Infine ringrazio tutti coloro che mi hanno sempre incoraggiata: mia madre, mio padre e mio fratello perché mi ricordano quali sono le cose importanti; i miei amici, colleghi tutti e in particolare i miei compagni di ufficio (Ilaria, Amos, Lorenza, Fabio e Francesco) perché rallegrano le giornate di lavoro.