UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Analisi del comportamento termico di un edificio riqualificato nel rispetto degli attuali incentivi fiscali

Analysis of the thermal performance of a upgraded building in observance of the current tax incentives

Relatore:
Prof. Ing. Costanzo Di Perna

Tesi di Laurea di:
Giada Remia

A.A. 2019/2020

Sommario

1. INTRODUZIONE **4**

2. METODI E NORMATIVE **5**

2.1 METODO DINAMICO ORARIO UNI EN ISO 52016-1:2018 5
2.1.1 Dati di Input *5*
2.1.2 Algoritmo di Calcolo *5*
2.1.2.1 Metodologia Adottata nell'Allegato Nazionale A e Utilizzata nelle Analisi *6*
2.2 METODO SEMI STAZIONARIO UNI TS 11300 7
2.3 NORMATIVE UTILIZZATE PER LE ANALISI 7
2.3.1 Determinazione delle Proprietà Termo-Fisiche dei Materiali Utilizzati *7*
2.3.2 Determinazione dei Parametri Dinamici delle Strutture Utilizzate *8*
2.3.3 Analisi Termo-Igrometriche delle Strutture Utilizzate *8*
2.3.4 Determinazione del Fattore Medio di Luce Diurna *8*
2.3.5 Modello di Comfort Adattivo *8*
2.3.6 Costante di Tempo *8*

3. MODELLI **9**

3.1 CASI STUDIO 9
3.1.1 Caratteristiche Geometriche *9*
3.1.2 Progettazione Dimensioni Finestre: Fattore Medio di Luce Diurna *10*
3.1.3 Zone Termiche Riscaldate e Non Riscaldate *12*
3.1.4 Località Considerate per le Analisi *12*
3.2 CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI DELL'INVOLUCRO EDILIZIO 13
3.2.1 Strutture Opache Verticali *13*
3.2.2 Strutture Opache Orizzontali ed Inclinate *15*
3.2.3 Strutture Trasparenti *16*
3.2.4 Strutture Opache Fisse Utilizzate per la Villetta Senza Sottotetto (Caso Studio 1) *16*
3.2.5 Strutture Opache Fisse Utilizzate per la Villetta con Solaio di Sottotetto Isolato e Copertura Non Isolata (Caso Studio 2) *17*
3.2.6 Strutture Opache Fisse Utilizzate per la Villetta con Solaio di Sottotetto Non Isolato e Copertura Isolata (Caso Studio 3) *18*
3.2.7 Strutture Opache Utilizzate per l'Edificio Massivo *19*
3.2.8 Strutture Opache Utilizzate per L'Edificio Leggero *20*
3.3 IMPIANTI E VENTILAZIONE 21
3.3.1 Metodo Semi Stazionario (UNI TS 11300) *21*
3.3.2 Metodo Dinamico (UNI EN ISO 52016) *21*

4. ANALISI RISULTATI: METODO DINAMICO UNI EN ISO 52016-1 **22**

4.1 VALUTAZIONE DEL FABBISOGNO DI ENERGIA UTILE DI UNA VILLETTA UNIFAMILIARE SENZA SOTTOTETTO CON COPERTURA ISOLATA 22
4.1.1. Milano *22*
4.1.2 Roma *28*
4.1.3 Palermo *33*
4.2 VALUTAZIONE DEL FABBISOGNO DI ENERGIA UTILE DI UNA VILLETTA UNIFAMILIARE CON SOLAIO DI SOTTOTETTO ISOLATO E COPERTURA NON ISOLATA 39
4.2.1 Milano *39*
4.2.2 Roma *43*
4.2.3 Palermo *47*
4.3 CONFRONTO VILLETTA UNIFAMILIARE SENZA SOTTOTETTO CON VILLETTA UNIFAMILIARE CON SOLAIO DI SOTTOTETTO ISOLATO E COPERTURA NON ISOLATA 51
4.3.1 Milano *52*
4.3.2 Roma *54*

4.3.3 Palermo *56*
4.4 VALUTAZIONE DEL FABBISOGNO DI ENERGIA UTILE IN FUNZIONE DELL'ISOLAMENTO DEL SOLAIO DI SOTTOTETTO O DELLA COPERTURA 59
4.4.1 Milano *60*
4.4.2 Roma *62*
4.4.3 Palermo *63*
4.5 VALUTAZIONE DEL FABBISOGNO DI ENERGIA UTILE IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI STRUTTURA (MASSIVA E LEGGERA) 66
4.5.1 Milano *66*
4.5.1 Roma *68*
4.5.1 Palermo *69*
4.6 APPROFONDIMENTO PARAGRAFO 4.1: VALUTAZIONE DEL FABBISOGNO DI ENERGIA UTILE ASSOCIATO AD UNA STRUTTURA CON CAPACITÀ TERMICA INTERNA AREICA MOLTO ELEVATA (90 KJ/M^{2}K) 72
4.6.1 Milano *72*
4.6.2 Roma *76*
4.6.3 Palermo *79*
4.7 ANALISI STATISTICA: VALUTAZIONE DEL PESO SUL FABBISOGNO DI ENERGIA UTILE DEI PARAMETRI TERMO-FISICI DEGLI ELEMENTI DELL'INVOLUCRO EDILIZIO 82
4.7.1 Calcolo delle Matrici di Correlazione *82*
4.7.1 Calcolo del Peso per Correlazione *84*
4.7.3 Conclusioni *87*
4.8 VALUTAZIONE DEL BENESSERE TERMICO IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI STRUTTURA MEDIANTE IL MODELLO DI COMFORT ADATTIVO 89
4.8.1 Milano *92*
4.8.2 Roma *94*
4.8.3 Palermo *95*
4.8.4 Conclusioni *97*
4.9 VALUTAZIONE DEL BENESSERE TERMICO IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI STRUTTURA MEDIANTE IL MODELLO DI COMFORT ADATTIVO CON MAGGIORE PORTATA D'ARIA NOTTURNA 98
4.9.1 Milano *98*
4.9.2 Roma *99*
4.9.3 Palermo *100*
4.9.4 Conclusioni *102*
4.10 ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA OPERATIVA IN FUNZIONE DELL'INTERMITTENZA DELL'IMPIANTO DI RISCALDAMENTO 103
4.10.1 Potenza Infinita: Decadimento della Temperatura Operativa a Seguito dello Spegnimento dell'Impianto di Riscaldamento *103*
4.10.1.1 Milano (Zona Climatica E) *104*
4.10.1.2 Roma (Zona Climatica D) *107*
4.10.1.3 Palermo (Zona Climatica B) *111*
4.10.2 Potenza Ridotta: Tempo di Ripresa della Temperatura Operativa a Seguito dell'Accensione dell'Impianto di Riscaldamento *113*
4.10.2.1 Milano *113*
4.10.2.2 Roma *116*
4.10.2.3 Palermo *120*
4.10.2.4 Conclusioni *123*
4.10.3 Fattori di Carico in Funzione della Potenza Fornita dall'Impianto di Riscaldamento *124*
4.10.3.1 Milano, Roma, Palermo *124*
4.10.3.2 Conclusioni *131*
5. ANALISI RISULTATI: METODO SEMI STAZIONARIO UNI TS 11300-1 **132**
5.1 VALUTAZIONE DELLA COSTANTE DI TEMPO IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI STRUTTURA (MASSIVA E LEGGERA), DEI RICAMBI DI ARIA E DELL'ISOLAMENTO DEL SOLAIO DI SOTTOTETTO 132

5.1.1 Analisi 1: Valutazione della Costante di Tempo in Funzione della Capacità Termica Interna e del Coefficiente di Scambio per la Ventilazione *133*
5.1.1.1 Milano *133*
5.1.1.1.1 Caso Studio 2: Solaio di Sottotetto Isolato con Copertura non Isolata *134*
5.1.1.1.2 Caso Studio 3 Solaio di Sottotetto non Isolato con Copertura Isolata *137*
5.1.1.2 Roma *140*
5.1.1.2.1 Caso Studio 2: Solaio di Sottotetto Isolato con Copertura non Isolata *140*
5.1.1.2.2 Caso Studio 3: Solaio di Sottotetto non Isolato con Copertura Isolata *144*
5.1.1.3 Palermo *147*
5.1.1.3.1 Caso Studio 2: Solaio di Sottotetto Isolato con Copertura non Isolata *147*
5.1.1.3.2 Caso Studio 3: Solaio di Sottotetto non Isolato con Copertura Isolata *151*
5.1.2 Analisi 2: Valutazione della Costante di Tempo Associata al Primo Piano in Funzione della Tipologia di Solaio di Sottotetto *154*
5.1.2.1 Milano *154*
5.1.2.2 Roma *156*
5.1.2.3 Palermo *157*
5.1.3 Analisi della Variazione dei Coefficienti di Scambio Termico per Trasmissione e Ventilazione *158*
5.1.4 Fattore di Utilizzazione e Costante di Tempo *161*
5.1.4.1 Milano *161*
5.1.4.2 Roma *168*
5.1.4.3 Palermo *173*
Conclusioni Analizzando i Risultati delle Diverse Località *178*
5.2 VALUTAZIONE DEL FABBISOGNO DI ENERGIA UTILE IN FUNZIONE DEI RICAMBI DI ARIA 179
5.2.1 Milano *179*
5.2.2 Roma *181*
5.2.3 Palermo *184*
5.2.4 Conclusioni *187*
5.3 VALUTAZIONE DEL FABBISOGNO DI ENERGIA UTILE IN FUNZIONE DEL GRADO DI VENTILAZIONE DELL'AMBIENTE DI SOTTOTETTO 188
5.3.1 Milano *188*
5.3.2 Roma *190*
5.3.3 Palermo *193*
5.3.4 Conclusioni *195*
6. CONCLUSIONI **196**

1. Introduzione

Lo scopo di questa tesi di laurea è analizzare il comportamento termico di un edificio sottoposto a demolizione e ricostruzione mediante il metodo di calcolo dinamico, riportato nella norma UNI EN ISO 52016-1:2018, e il metodo di calcolo semi stazionario, riportato nella norma UNI TS 11300-1:2014. In particolare, l'edificio deve rispettare i limiti imposti per usufruire dell'incentivo fiscale stabilito dalla Legge n.77 del 17 luglio 2020 (Superbonus 100%). Per poter usufruire di tale incentivo, è obbligatorio garantire, intervenendo sull'involucro e/o sull'impianto, un salto di almeno due classi energetiche, oltre al rispetto dei limiti imposti sui valori di trasmittanza termica riguardo l'involucro edilizio riportati nell'allegato E, Tab.1 del Decreto 6 agosto 2020. In questo caso, a seguito della ricostruzione e dell'intervento per la predisposizione di nuovi impianti, si è passati da una classe energetica di partenza G ad una classe energetica di arrivo A4 per tutti i casi studio analizzati, che verranno descritti nel capitolo 3.

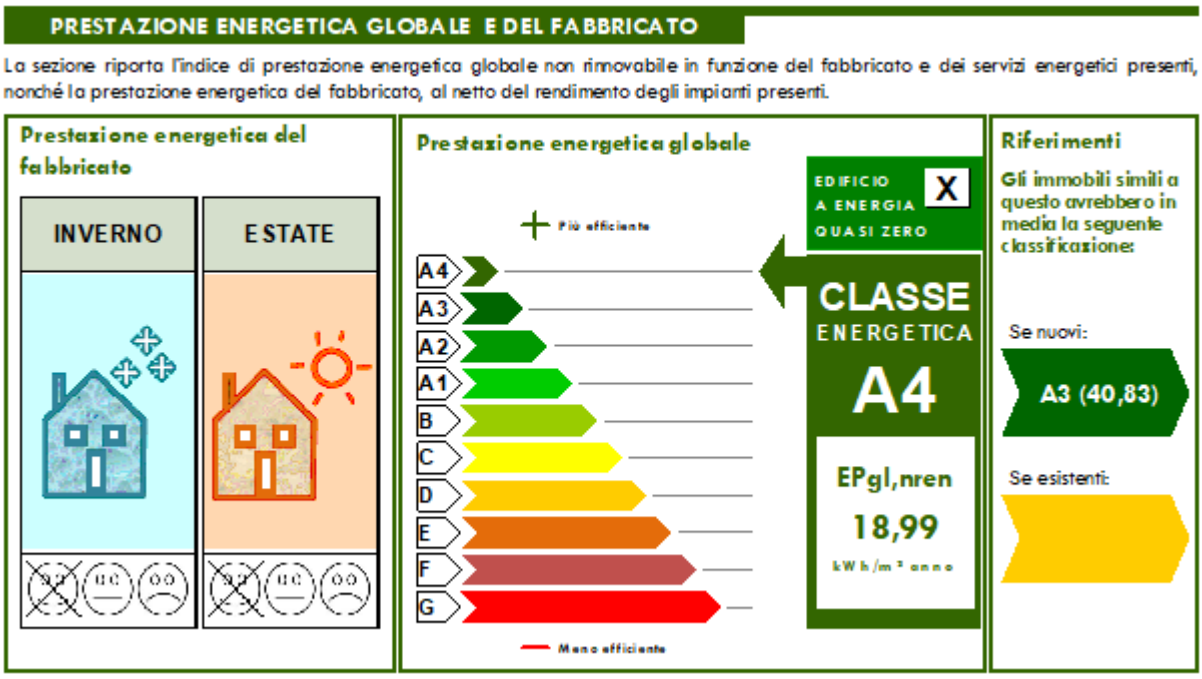

Figura 1: Classificazione Energetica Esempio Associata ad un Caso Studio e Tipologia di Struttura (Località: Milano)

L'analisi del comportamento termico riguarda:

- Valutazione dell'influenza sui fabbisogni di energia utile dei principali parametri termo-fisici caratterizzanti gli elementi dell'involucro edilizio mediante il metodo dinamico orario.
- Valutazione del comfort termico mediante il metodo adattivo (UNI EN 16798-1:2019).
- Valutazione dell'incidenza dell'intermittenza dell'impianto di riscaldamento sulle temperature operative determinate mediante il metodo di calcolo dinamico.
- Valutazione dei fabbisogni di energia utile e della costante di tempo mediante il metodo semi stazionario.

L'obiettivo principale di tali analisi è comprendere come i parametri termo-fisici caratterizzanti l'involucro edilizio influenzino i fabbisogni di energia utili per il riscaldamento e il raffrescamento determinati attraverso il metodo dinamico. Tale metodo nei prossimi anni potrebbe essere introdotto in sostituzione dell'attuale metodo descritto nella norma tecnica UNI TS 11300.

2. Metodi e Normative

2.1 Metodo Dinamico Orario UNI EN ISO 52016-1:2018

Con la pubblicazione della UNI EN ISO 52016-1 si introduce un nuovo metodo che definisce il calcolo del bilancio energetico dell'involucro dell'edificio ora per ora, permettendo di ottenere l'andamento della temperatura operativa e il carico termico richiesto all'impianto associati ad ogni ora. Tale metodo ha quindi l'obiettivo di valutare il comportamento energetico degli edifici, garantendo risultati più attendibili rispetto all'attuale metodo semi-stazionario utilizzato (UNI TS 11300:2014), poiché tiene in considerazione le reali condizioni d'uso dell'edificio e la variazione oraria dei dati climatici.

2.1.1 Dati di Input

Per l'applicazione del metodo dinamico orario, la UNI EN ISO 52016-1 richiede di disporre di dati climatici definiti su base oraria, quali temperatura oraria dell'aria esterna della località di interesse, il contenuto di umidità dell'aria esterna, l'irradianza solare oraria, diretta e diffusa, su piano orizzontale e su superficie inclinata e variamente orientata (nord, est, sud e ovest) e la velocità del vento. Per le zone termiche condizionate si richiedono per ogni ora i parametri relativi alle condizioni di utilizzo ed agli impianti tecnici, cioè il set-point di temperatura per il riscaldamento e il raffrescamento, la potenza dell'impianto, il flusso di ventilazione entrante e gli apporti interni. L'impianto può essere considerato a potenza infinita per il calcolo del fabbisogno energetico, a potenza nulla per la determinazione del comfort termico oppure a potenza reale. Ovviamente andranno definite le caratteristiche geometriche di tali zone termiche e dei componenti dell'edificio, definiti sia geometricamente sia attraverso i parametri termo-fisici che li caratterizzano. Gli elementi costruttivi opachi, ai fini dell'applicazione del metodo dinamico orario, sono discretizzati spazialmente in una serie di nodi in funzione della metodologia utilizzata, mentre gli elementi trasparenti e le porte sono schematizzati con un unico strato delimitato da due nodi.

2.1.2 Algoritmo di Calcolo

Utilizzando i dati di input sopra elencati, l'algoritmo di calcolo definito dalla norma UNI EN ISO 52016-1 fornisce in output, per ogni zona termica e per ogni ora, i valori dei seguenti parametri: la temperatura interna dell'aria, la temperatura interna media radiante, la temperatura interna operativa (utili ai fini della valutazione del comfort interno degli ambienti) e il carico effettivo di riscaldamento o raffrescamento (per la valutazione del fabbisogno di energia dell'edificio). La procedura di calcolo è costituita da una serie di step, da applicare per ogni zona termica e per ogni intervallo temporale orario:

1. Verifica della necessità di raffrescamento o riscaldamento all'interno della zona termica in base al confronto tra la temperatura operativa valutata in assenza di impianti e le temperature di set-point per il riscaldamento e per il raffrescamento.
2. Nel caso sia necessario attivare l'impianto di riscaldamento/raffrescamento, si calcolano i carichi di riscaldamento/raffrescamento necessari a garantire il raggiungimento della temperatura di set-point stabilita.
3. Si verifica se la potenza di riscaldamento/raffrescamento disponibile fornita dall'impianto è sufficiente e si calcolano le temperature dei nodi delle strutture assegnandole al termine dell'ora considerata, ovvero all'inizio dell'intervallo temporale successivo.
4. Se la potenza dell'impianto non è sufficiente, si calcolano la temperatura interna operativa e le temperature dei nodi delle strutture, assegnandole al termine dell'ora considerata.
5. La procedura si conclude determinando il carico di energia effettivo per il riscaldamento o per il raffrescamento.

Per determinare le temperature dei nodi delle strutture, l'algoritmo di calcolo richiede, per ogni intervallo temporale, la risoluzione di un sistema di equazioni di bilancio energetico svolto sia a livello di zona che a livello di singolo elemento costruttivo. Il bilancio termico di zona prevede, per ogni zona termica, la valutazione della capacità termica interna, degli scambi termici convettivi con i nodi superficiali di tutte le strutture che la delimitano, dello scambio termico per ventilazione, dello scambio termico dovuto ai ponti termici e, infine, delle frazioni convettive degli apporti interni totali, degli apporti solari trasmessi direttamente attraverso le superfici vetrate e degli apporti dovuti al carico del sistema di riscaldamento/raffrescamento.

I bilanci termici degli elementi edilizi sono svolti, invece, a livello di ogni nodo e si differenziano in base alla posizione dello stesso nella stratigrafia dell'elemento costruttivo. Si distinguono infatti:

- I bilanci energetici dei nodi superficiali delle strutture rivolti verso l'ambiente interno, che considerano gli scambi termici convettivi con l'aria interna, gli scambi termici conduttivi con il primo nodo interno alla struttura stessa, gli scambi termici per irraggiamento con i nodi superficiali di tutte le strutture delimitanti la zona termica, l'eventuale capacità termica associata al nodo superficiale considerato e le quote complementari delle frazioni convettive degli apporti interni totali, degli apporti solari trasmessi direttamente attraverso le superfici vetrate e degli apporti dovuti al carico del sistema di riscaldamento/raffrescamento, le stesse valutate anche per il bilancio di zona.
- I bilanci energetici dei nodi interni alle strutture edilizie, che considerano gli scambi termici conduttivi con i nodi adiacenti e le eventuali capacità termiche associate ai nodi stessi.
- I bilanci energetici dei nodi superficiali delle strutture rivolti verso l'ambiente esterno, che considerano gli scambi termici convettivi con l'aria esterna, gli scambi termici per irraggiamento con la volta celeste e gli apporti solari calcolati in funzione del coefficiente di assorbimento solare, dell'irraggiamento solare diretto e diffuso e dell'eventuale fattore di ombreggiamento dovuto ad ostacoli esterni.

La complessità del sistema matriciale risolutivo sarà correlata al numero di equazioni individuate, che dipenderà dal numero di strutture delimitanti la zona termica e dal numero di strati caratterizzanti ogni singola struttura. Esistono due diverse modalità di discretizzazione spaziale degli elementi opachi, la prima impone una suddivisione in 4 strati delimitati da 5 nodi fissi, a prescindere dal numero di strati costituenti la struttura (metodologia secondo Appendice B, proposta europea), nella seconda modalità invece la discretizzazione avviene con numero di nodi variabile in funzione del numero di Fourier calcolato per ogni strato reale costituente la struttura (metodologia adottata nell'Allegato Nazionale A).

2.1.2.1 Metodologia Adottata nell'Allegato Nazionale A e Utilizzata nelle Analisi

La principale differenza tra le due metodologie consiste nell'individuazione e nella quantificazione dei nodi capacitivi e degli strati resistivi. Per il j-esimo strato reale del componente edilizio si calcola il numero di nodi capacitivi attraverso l'utilizzo della seguente espressione:

$$Ncn_j = \max\left\{1;\ \left[\sqrt{\frac{F0_{ref}}{F0_j + 0.999999}}\right]\right\}$$

Dove $F0_{ref}$ è il numero di Fourier di riferimento posto pari a 0.5, mentre F_{0j} è il numero di Fourier del j-esimo strato, calcolato come:

$$F0_j = \Delta t\ \frac{\lambda}{\rho_j * c_j * d_j}$$

Dove ρ_j è la massa volumica del materiale costituente il j-esimo strato dell'elemento costruttivo (kg/m^3), c_j è la capacità termica areica del materiale costituente il j-esimo strato dell'elemento costruttivo (J/(kg K)) e d_j è lo spessore del materiale costituente il j-esimo strato dell'elemento costruttivo (m).

Ad ogni nodo capacitivo individuato per il j-esimo strato si assegna un valore di capacità termica areica calcolato in funzione delle proprietà fisiche del materiale costituente lo strato stesso (massa volumica ρ_j, capacità termica areica c_j, e spessore d_j) e del numero di nodi capacitivi individuato per il j-esimo strato stesso. Una volta individuate le posizioni dei singoli nodi all'interno del j-esimo strato, si procede assegnando ai conseguenti strati resistivi valori di conduttanza calcolati in funzione della resistenza termica del materiale costituente il j-esimo strato stesso e del numero di nodi capacitivi individuato per il medesimo strato. È opportuno precisare che, all'atto pratico, per l'utilizzatore del metodo si tratterà di inserire nel software dedicato le stratigrafie degli elementi costruttivi, l'individuazione e il posizionamento dei nodi e relativi parametri sarà svolta automaticamente dalla procedura di calcolo.

2.2 Metodo Semi Stazionario UNI TS 11300

Per la realizzazione della certificazione energetica e la verifica di rispondenza ai requisiti di legge (D.lgs 192/2015 e DM 26/06/2016) è stata utilizzata la specifica tecnica UNI TS 11300, nata con l'obiettivo di definire una metodologia di calcolo univoca per la determinazione delle prestazioni energetiche degli edifici. Questa metodologia di calcolo, rispetto alla precedente, tratta la valutazione dei fabbisogni di energia invernali ed estivi considerando come intervallo di calcolo il mese. Essa al momento è suddivisa in sei parti, per il calcolo del fabbisogno di energia utile per il riscaldamento e il raffrescamento è stata utilizzata la prima parte, ovvero la UNI TS 11300-1:2014 (determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale).

2.3 Normative Utilizzate per le Analisi

2.3.1 Determinazione delle Proprietà Termo-Fisiche dei Materiali Utilizzati

Le proprietà termo-fisiche dei materiali utilizzati nelle stratigrafie oggetto di studio sono state determinate mediante le seguenti norme tecniche:

UNI EN ISO 6946: Componenti ed Elementi per Edilizia - Resistenza Termica e Trasmittanza Termica - Metodo di calcolo

UNI 10351 – Prosp. A1 e Prosp.2: Materiali da Costruzione - Conduttività Termica e Permeabilità al Vapore

UNI 10355: Murature e Solai - Valori della Resistenza Termica e Metodo di Calcolo

UNI EN ISO 10456: Materiali e Prodotti per Edilizia - Proprietà Igrometriche - Valori Tabulati di Progetto e Procedimenti per la Determinazione dei Valori Termici Dichiarati e di Progetto

UNI EN 1745: Muratura e Prodotti per Muratura - Metodi per Determinare i Valori Termici di Progetto

2.3.2 Determinazione dei Parametri Dinamici delle Strutture Utilizzate

Al fine della determinazione dei parametri dinamici caratterizzanti i componenti edilizi considerati, quali trasmittanza termica periodica, fattore di attenuazione, sfasamento, capacità termica areica interna, capacità termica areica esterna ed ammettenza interna, è stata utilizzata la seguente norma tecnica:

UNI EN ISO 13786: Prestazione Termica dei Componenti per Edilizia - Caratteristiche Termiche Dinamiche - Metodi di calcolo

2.3.3 Analisi Termo-Igrometriche delle Strutture Utilizzate

Per la verifica della condensazione interstiziale e superficiale riguardo i componenti edilizi considerati è stata utilizzata la seguente norma tecnica:

UNI EN ISO 13788: Prestazione Igrotermica dei Componenti e degli Elementi per Edilizia - Temperatura Superficiale Interna per Evitare l'Umidità Superficiale Critica e la Condensazione Interstiziale - Metodi di Calcolo

2.3.4 Determinazione del Fattore Medio di Luce Diurna

Il dimensionamento delle finestre dei casi studio considerati è stato effettuato secondo il calcolo del fattore medio di luce diurna, riportato nel DM 05/07/75 e nella UNI 10840:2007. L'applicazione della metodologia di calcolo con i relativi risultati è riportata in dettaglio nel paragrafo 3.1.2.

2.3.5 Modello di Comfort Adattivo

Al fine della valutazione del benessere termico all'interno degli ambienti dell'edificio oggetto di studio è stato utilizzato il modello di comfort adattivo definito dalla norma UNI EN 16798-1:2019. L'applicazione di tale metodologia con i relativi risultati è riportata in dettaglio nei paragrafi 4.7 (spiegazione del metodo e risultati) e 4.8 (risultati).

2.3.6 Costante di Tempo

Il calcolo della costante di tempo utilizzata per l'analisi del comportamento termico dell'edificio in regime semi stazionario è stato realizzato utilizzando la seguente norma tecnica:

UNI EN ISO 13790: Prestazione Energetica degli Edifici – Calcolo del Fabbisogno di Energia per il Riscaldamento e il Raffrescamento

La definizione e il calcolo della costante di tempo e dei parametri ad essa correlati è riportata in dettaglio nel paragrafo 5.1.

3. Modelli

3.1 Casi Studio

3.1.1 Caratteristiche Geometriche

Si è scelta come oggetto delle analisi riportate nel successivo capitolo una villetta unifamiliare di nuova costruzione, composta da due piani, realizzata secondo tre diverse configurazioni. Il caso studio 1 riguarderà la viletta priva del locale di sottotetto (non sarà presente un volume non riscaldato al di sopra del primo piano), il caso studio due riguarderà la villetta dotata di solaio di sottotetto isolato e copertura non isolata ed infine il caso studio 3 riguarderà la villetta dotata di solaio di sottotetto non isolato e copertura isolata. La scelta di analizzare queste tre diverse configurazioni è dovuta alle seguenti considerazioni:

- Si vuole stabilire se la presenza di una zona termica non riscaldata al di sopra del primo piano, generata dalla presenza del solaio di sottotetto isolato, determini un comportamento diverso rispetto al caso in cui il locale di sottotetto non sia presente e, nel caso questo comportamento sia effettivamente diverso, in che modalità differisca.
- La scelta di studiare il comportamento dell'edificio nel caso in cui esso sia dotato di solaio di sottotetto isolato o meno è dovuta all'introduzione della Legge di Bilancio 2021 (Legge 30/12/2020 n. 178), la quale stabilisce la possibilità di usufruire dell'incentivo fiscale (Superbonus 110%) anche sull'isolamento termico della copertura pur in presenza di un sottotetto o soffitta non riscaldati. Nella prima formulazione la normativa non permetteva la detrazione di tale intervento se era presente al di sotto della copertura un ambiente non riscaldato. Poiché l'intervento di coibentazione può avvenire sulla copertura o sul solaio di sottotetto, lo scopo sarà determinare quale dei due interventi sia migliore dal punto di vista dei fabbisogni di energia e del comfort termico analizzando i due diversi casi studio proposti (2 e 3).

L'edificio unifamiliare è composto al piano terra da un bagno, un ripostiglio, una cucina e un soggiorno, mentre al piano primo sono presenti due camere singole, una camera matrimoniale, un bagno e un disimpegno. Il vano scala viene classificato come zona termica non riscaldata, come anche la zona di sottotetto per i casi studio 2 e 3.

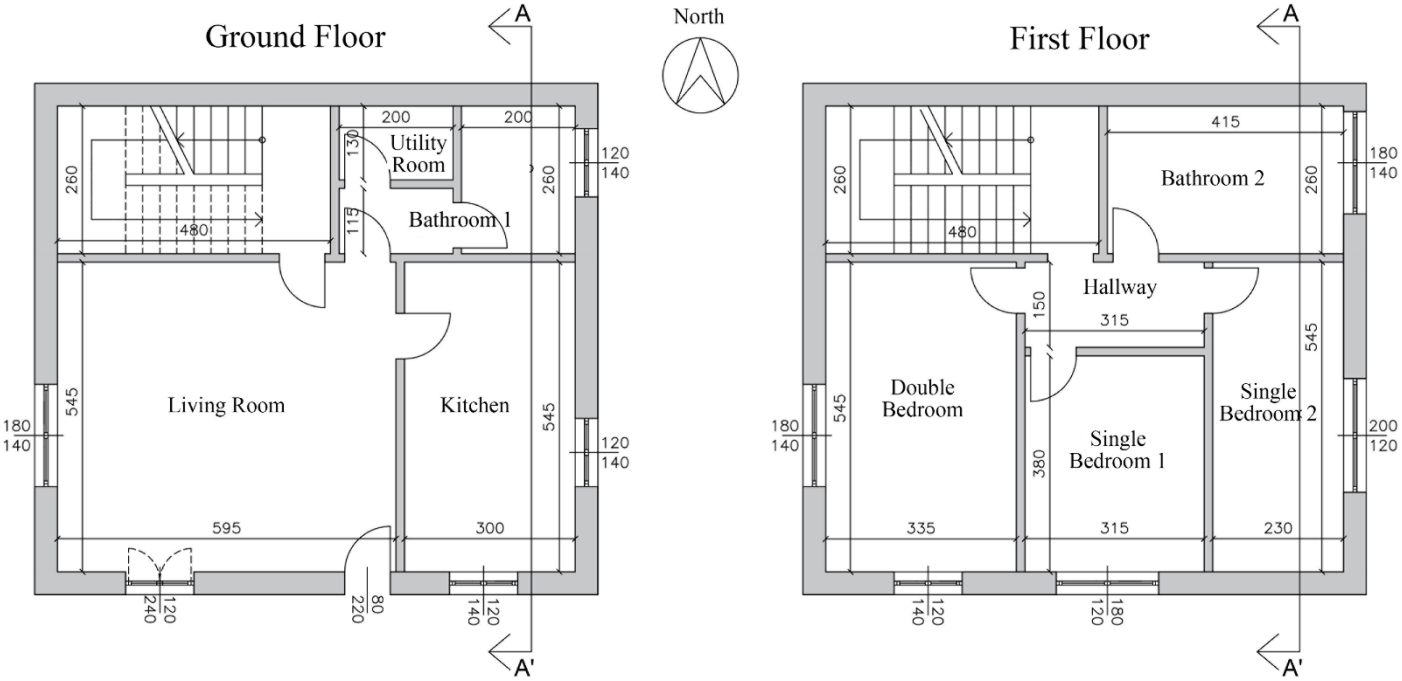

Figura 2: Piano Terra e Primo Piano (Caso Studio 1,2,3)

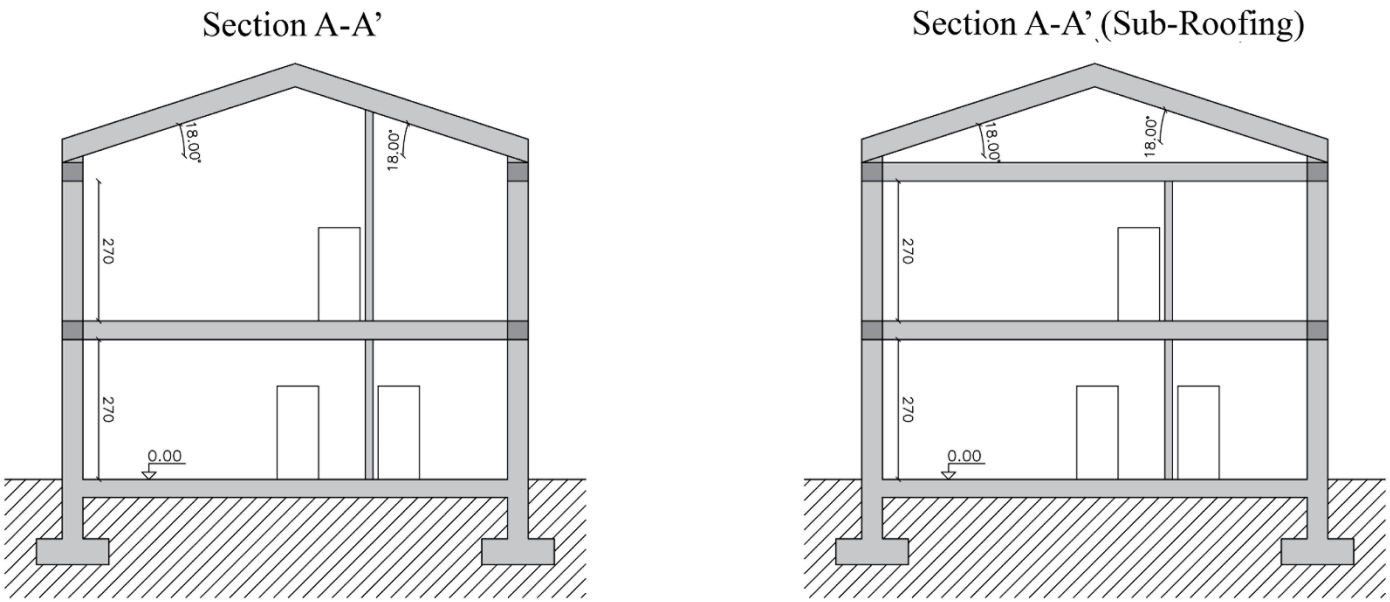

Figura 3: Sezione Caso Studio 1 (Sinistra, Villetta Senza Sottotetto), Sezione Caso Studio 2 e 3 (Destra, Villetta con Solaio di Sottotetto)

Nelle seguenti tabelle sono riportate le caratteristiche geometriche interne dei locali associate ai tre casi studio. Nel piano terra, le aree, i volumi e le altezze medie dei locali rimangono costanti in tutti i casi studio, mentre nel primo piano la presenza del solaio di sottotetto andrà a ridurre il volume degli ambienti, la cui altezza sarà fissata a 2,70 m. Quindi nel caso studio 1 non essendoci un solaio di sottotetto i volumi e le altezze medie saranno maggiori rispetto al caso studio 2 e 3, dove invece si aggiunge il volume del locale di sottotetto.

Room	**Case Study 1**			**Case Study 2, Case Study 3**		
	Net Area	Net Volume	Net Average Height	Net Area	Net Volume	Net Average Height
[-]	[m^2]	[m^3]	[m]	[m^2]	[m^3]	[m]
Bathroom 1	7.50	20.25	2.70	7.50	20.25	2.70
Utility Room	2.60	7.02	2.70	2.60	7.02	2.70
Kitchen	16.35	44.15	2.70	16.35	44.15	2.70
Living Room	32.43	87.55	2.70	32.43	87.55	2.70
Bathroom 2	10.79	33.69	3.12	10.79	29.13	2.70
Hallway	4.73	18.11	3.83	4.73	12.76	2.70
Single Bedroom 1	11.97	39.71	3.32	11.97	32.32	2.70
Single Bedroom 2	12.54	43.58	3.48	12.54	33.84	2.70
Double Bedroom	18.26	63.47	3.48	18.26	49.30	2.70
Stairwell	12.48	72.66	5.82	12.48	67.39	5.40
Sub-Roofing	0.00	0.00	0.00	74.62	49.67	0.67

Tabella 1: Caratteristiche Geometriche Interne dei Locali Costituenti la Villetta Unifamiliare (Caso Studio 1,2,3)

3.1.2 Progettazione Dimensioni Finestre: Fattore Medio di Luce Diurna

Secondo il DM 05/07/1975 tutti i locali, ad esclusione di vani scala e ripostigli, devono fruire di un'adeguata luce naturale diretta in funzione della destinazione d'uso. Tale illuminazione naturale, nel caso residenziale, deve essere assicurata tramite la realizzazione di finestre con ampiezza tale da garantire un valore del fattore medio di luce diurna non inferiore al 2%, inoltre la superficie apribile non deve essere inferiore a 1/8 della superficie del pavimento del locale. Il fattore medio di luce diurna è definito come il rapporto, espresso in percentuale, tra l'illuminamento medio dell'ambiente e l'illuminamento che si ha nello stesso istante su una

superficie orizzontale esterna esposta alla volta celeste con cielo coperto, esso viene calcolato mediante la seguente equazione:

$$FLD_m = \frac{A_g * \tau * \varepsilon * \Psi}{(1 - \rho_m) * A_{tot}}$$

Dove A_g è l'area della superficie finestrata escluso il telaio, τ è il fattore di trasmissione luminosa del vetro, ε è il fattore finestra (rappresentativo della posizione della volta celesta vista dal baricentro della finestra), A_{tot} è l'area totale delle superfici che delimitano l'ambiente (pareti, pavimento, soffitto), ρ_m è il fattore medio di riflessione luminosa delle superfici che delimitano l'ambiente (dipenderà dalla finitura di tali superfici) e Ψ è il fattore di riduzione del fattore finestra. Nel caso di finestre verticali senza ostruzioni ε si assume pari a 0,50 ed essendo tali finestre posizionate a filo delle pareti esterne il fattore di riduzione Ψ sarà pari ad 1. Il fattore medio di riflessione luminosa, se le superfici dell'ambiente con finitura diversa sono k, viene calcolato mediante la seguente formula:

$$\rho_m = \frac{\sum_k A_k * \rho_k}{A_{tot}}$$

In questo caso la finitura delle pareti e del soffitto viene realizzata con intonaco bianco, corrispondente ad un fattore di riflessione di 0,80, mentre il pavimento è assunto di tinta chiara, corrispondente ad un fattore di riflessione di 0,50. Il vetro scelto è caratterizzato da un fattore di trasmissione luminosa pari a 0,35. Avendo determinato tutti i parametri precedentemente elencati, fissando come fattore medio di luce diurna il minimo imposto da normativa sarà possibile determinare mediante la formula inversa l'area vetrata minima necessaria in ogni ambiente per garantire un'adeguata luce naturale:

Room	Width	Lenght	Height	Area Walls	Area Ceiling	Area Floor	Total Area	τ	ε	ρ_m	Ψ	$FLD_{m,min}$	$A_{g,min}$
[-]	[m]	[m]	[m]	[m^2]	[m^2]	[m^2]	[m^2]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[m^2]
Bathroom 1	2.00	2.60	2.70	24.84	5.20	5.20	35.24	0.35	0.50	0.76	1.00	0.02	1.00
Living Room	5.45	5.95	2.70	61.56	32.43	32.43	126.42	0.35	0.50	0.72	1.00	0.02	4.06
Kitchen	3.00	5.45	2.70	45.63	16.35	16.35	78.33	0.35	0.50	0.74	1.00	0.02	2.40
Bathroom 2	4.15	2.60	2.70	36.45	10.79	10.79	58.03	0.35	0.50	0.74	1.00	0.02	1.74
Double Bedroom	5.45	3.35	2.70	47.52	18.26	18.26	84.04	0.35	0.50	0.73	1.00	0.02	2.59
Single Bedroom 1	3.80	3.15	2.70	37.53	11.97	11.97	61.47	0.35	0.50	0.74	1.00	0.02	1.83
Single Bedroom 2	2.30	5.45	2.70	41.85	12.54	12.54	66.92	0.35	0.50	0.74	1.00	0.02	2.00

Tabella 2: Determinazione dell'Area Vetrata Minima per Ogni Ambiente in Funzione del Fattore di Luce Diurna

Dalle aree minime calcolate è stato possibile determinate le dimensioni effettive delle finestre da utilizzare in ogni ambiente, specificando l'area del vetro A_g, l'area del telaio A_f e l'area della finestra A_w:

Window Width	Window Height	Glass Width	Glass Height	A_g	A_f	A_w
[m]	[m]	[m]	[m]	[m^2]	[m^2]	[m^2]
1.20	1.40	0.48	1.26	1.21	0.47	1.68
1.80	1.40	0.78	1.26	1.97	0.55	2.52
2.00	1.40	0.88	1.26	2.22	0.58	2.80
1.20	2.40	0.48	2.26	2.17	0.71	2.88

Tabella 3: Dimensioni Geometriche delle Finestre Scelte

Nella seguente tabella sono riportate le verifiche per ogni ambiente riguardo il fattore medio di luce diurna e il rapporto tra la superficie apribile delle finestre e l'area del pavimento dell'ambiente considerato, utilizzando le dimensioni delle finestre progettate:

Room	Window	A_w	A_g	A_{room}	A_w/A_{room}	FLD_m
[-]	[-]	[m^2]	[m^2]	[m^2]	[-]	[-]
Bathroom 1	1,20 x 1,40	1.68	1.21	5.20	1/3	2.46%
Living Room	1,80 x 1,40 + 1,20 x 2,40	5.40	4.14	32.43	1/6	2.07%
Kitchen	1,20 x 1,40 + 1,20 x 1,40	3.36	2.42	16.35	1/5	2.06%
Bathroom 2	1,80 x 1,40	2.52	1.97	10.79	1/4	2.32%
Double Bedroom	1,80 x 1,40 + 1,20 x 1,40	4.20	3.18	18.26	2/9	2.49%
Single Bedroom 1	1,80 x 1,40	2.52	1.97	11.97	1/5	2.17%
Single Bedroom 2	2,00 x 1,40	2.80	2.22	12.54	2/9	2.60%

Tabella 4: Verifiche Soddisfatte del Fattore Medio di Luce Diurna e del Rapporto Superficie Apribile Finestra/Superficie Ambiente

3.1.3 Zone Termiche Riscaldate e Non Riscaldate

Nelle analisi riguardanti l'utilizzo del metodo dinamico riportato nella norma UNI EN ISO 52016, ogni ambiente è stato considerato come una zona termica riscaldata, ad eccezione del vano scale e del locale di sottotetto che sono considerate zone termiche non riscaldate. Nelle analisi riguardanti l'utilizzo del metodo semi stazionario riportato nella norma UNI TS 11300-1, sono state considerate invece come zone termiche riscaldate il piano terra e il primo piano, quindi in questo caso non è presente la divisione dei singoli ambienti in zone termiche separate, ad eccezione del vano scale e del locale di sottotetto che risultano essere nuovamente zone termiche non riscaldate. Queste scelte sono dovute al fatto che utilizzando il metodo dinamico si andranno a valutare non solo i fabbisogni di energia, ma anche le temperature operative orarie associate ad ogni ambiente, mentre utilizzando il metodo semi stazionario ci si concentrerà esclusivamente sui fabbisogni di energia e sulla valutazione della costante di tempo associata ai due piani.

3.1.4 Località Considerate per le Analisi

Tutte le analisi verranno estese alle località di Milano, Roma e Palermo, che appartengono rispettivamente alle zone climatiche E, D e B, stabilite dal DPR 412/93.

3.2 Caratteristiche degli Elementi dell'Involucro Edilizio

Con lo scopo di valutare le prestazioni energetiche associate a diverse tipologie di involucri edilizi, per ogni località considerata sono state realizzate una serie di strutture di cui si sono determinati i principali parametri termo-fisici necessari per l'applicazione del metodo di calcolo dinamico (UNI EN ISO 52016) e semi stazionario (UNI TS 11300-1). Le seguenti strutture, sia opache che trasparenti, sono state progettate rispettando i valori di trasmittanza termica limite dichiarati nell'allegato E, Tab.1 del Decreto 6 agosto 2020 (requisiti tecnici per l'accesso alle detrazioni fiscali per la riqualificazione energetica degli edifici), in modo da poter usufruire delle detrazioni fiscali previste dalla Legge n.77 del 17 luglio 2020 riguardanti il Superbonus 110%.

3.2.1 Strutture Opache Verticali

Di seguito vengono riportati i principali parametri termo-fisici delle diverse tipologie di pareti progettate per ogni località. Sono presenti pareti realizzate con laterizio e cappotto esterno, pareti in termolaterizio e pareti leggere in acciaio. Per la località di Roma verranno utilizzate anche le pareti progettate per Milano, mentre per la località di Palermo verranno utilizzate sia le pareti progettate per Roma che per Milano, oltre alle pareti realizzate per la zona climatica di Palermo.

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Total Internal Heat Capacity	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Attenuation f_a	Time Shift ϕ	Areal Internal Heat Capacity k_J
-	-	[W/(m²K)]	[kg/m²]	[kJ/m²K]	[W/(m²K)]	[-]	[h]	[kJ/(m²K)]
Walls								
1	Milan	0.208	253.50	301.70	0.004	0.020	21.68	37.76
2	Milan	0.228	315.00	350.40	0.004	0.019	23.10	44.12
3	Milan	0.214	373.50	421.50	0.001	0.006	28.78	37.91
4	Milan	0.207	230.40	270.50	0.007	0.033	18.35	39.18
5	Milan	0.197	355.60	395.70	0.002	0.009	23.60	41.90
6	Milan	0.230	432.00	480.00	0.001	0.005	29.93	39.57
7	Milan	0.218	227.80	275.80	0.007	0.031	21.92	34.56
8	Milan	0.231	278.64	327.10	0.056	0.241	10.70	42.74
9	Milan	0.163	292.99	341.00	0.001	0.006	29.22	34.36
10	Milan	0.211	385.06	364.30	0.003	0.014	22.55	41.41
11	Milan	0.208	444.15	408.50	0.001	0.004	29.08	38.86
12	Milan	0.206	288.24	310.30	0.079	0.383	7.68	49.84
13	Milan	0.214	239.80	262.40	0.023	0.109	12.88	45.83
14	Milan	0.209	360.00	402.40	0.001	0.005	28.72	41.93
15	Milan	0.215	287.00	351.00	0.003	0.015	25.35	39.77
16	Milan	0.169	369.00	433.00	0.000	0.003	32.77	39.80
17	Milan	0.192	328.00	392.00	0.001	0.007	28.88	39.87
18	Milan	0.227	405.30	453.80	0.001	0.005	26.85	41.52
19	Milan	0.216	52.13	71.50	0.12	0.554	6.67	21.63

Tabella 5: Parametri Termo-Fisici Strutture Opache Verticali (Milano)

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Total Internal Heat Capacity	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Attenuation f_a	Time Shift ϕ	Areal Internal Heat Capacity k_J
-	-	[W/(m²K)]	[kg/m²]	[kJ/m²K]	[W/(m²K)]	[-]	[h]	[kJ/(m²K)]
Walls								
1	Rome	0.208	253.50	301.70	0.004	0.020	21.68	37.76
2	Rome	0.228	315.00	350.40	0.004	0.019	23.10	44.12
3	Rome	0.214	373.50	421.50	0.001	0.006	28.78	37.91
4	Rome	0.207	230.40	270.50	0.007	0.033	18.35	39.18
5	Rome	0.197	355.60	395.70	0.002	0.009	23.60	41.90
6	Rome	0.230	432.00	480.00	0.001	0.005	29.93	39.57
7	Rome	0.239	228.86	257.10	0.007	0.031	21.10	35.77
8	Rome	0.218	227.80	275.80	0.007	0.031	21.92	34.56
9	Rome	0.231	278.64	327.10	0.056	0.241	10.70	42.74
10	Rome	0.163	292.99	341.00	0.001	0.006	29.22	34.36
11	Rome	0.238	265.09	313.10	0.006	0.026	22.70	36.17
12	Rome	0.211	385.06	364.30	0.003	0.014	22.55	41.41
13	Rome	0.243	444.15	421.10	0.002	0.010	26.95	38.85
14	Rome	0.208	444.15	408.50	0.001	0.004	29.08	38.86
15	Rome	0.206	288.24	310.30	0.079	0.383	7.68	49.84
16	Rome	0.214	239.80	262.40	0.023	0.109	12.88	45.83
17	Rome	0.209	360.00	402.40	0.001	0.005	28.72	41.93
18	Rome	0.215	287.00	351.00	0.003	0.015	25.35	39.77
19	Rome	0.169	369.00	433.00	0.000	0.003	32.77	39.80
20	Rome	0.192	328.00	392.00	0.001	0.007	28.88	39.87
21	Rome	0.227	405.30	453.80	0.001	0.005	26.85	41.52
22	Rome	0.239	308.25	356.30	0.004	0.017	24.57	37.29
23	Rome	0.245	49.63	68.90	0.154	0.631	5.87	22.12

Tabella 6: Parametri Termo-Fisici Strutture Opache Verticali (Roma)

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Total Internal Heat Capacity	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Attenuation f_a	Time Shift ϕ	Areal Internal Heat Capacity k_J
-	-	[W/(m²K)]	[kg/m²]	[kJ/m²K]	[W/(m²K)]	[-]	[h]	[kJ/(m²K)]
Walls								
1	Palermo	0.208	253.50	301.70	0.004	0.020	21.68	37.76
2	Palermo	0.228	315.00	350.40	0.004	0.019	23.10	44.12
3	Palermo	0.214	373.50	421.50	0.001	0.006	28.78	37.91
4	Palermo	0.315	246.00	294.00	0.019	0.060	18.75	37.60
5	Palermo	0.343	294.00	342.00	0.018	0.052	18.18	44.02
6	Palermo	0.207	230.40	270.50	0.007	0.033	18.35	39.18
7	Palermo	0.197	355.60	395.70	0.002	0.009	23.60	41.90
8	Palermo	0.230	432.00	480.00	0.001	0.005	29.93	39.57
9	Palermo	0.355	228.00	256.20	0.026	0.074	16.83	39.10
10	Palermo	0.368	353.20	392.20	0.013	0.036	20.83	41.74
11	Palermo	0.356	274.85	303.00	0.018	0.050	18.55	40.55
12	Palermo	0.239	228.86	257.10	0.007	0.031	21.10	35.77
13	Palermo	0.218	227.80	275.80	0.007	0.031	21.92	34.56
14	Palermo	0.231	278.64	327.10	0.056	0.241	10.70	42.74
15	Palermo	0.163	292.99	341.00	0.001	0.006	29.22	34.36
16	Palermo	0.238	265.09	313.10	0.006	0.026	22.70	36.17
17	Palermo	0.370	271.14	319.30	0.115	0.310	8.68	43.64
18	Palermo	0.211	385.06	364.30	0.003	0.014	22.55	41.41
19	Palermo	0.243	444.15	421.10	0.002	0.010	26.95	38.85
20	Palermo	0.208	444.15	408.50	0.001	0.004	29.08	38.86
21	Palermo	0.343	375.06	343.30	0.011	0.033	20.35	41.30
22	Palermo	0.206	288.24	310.30	0.079	0.383	7.68	49.84
23	Palermo	0.214	239.80	262.40	0.023	0.109	12.88	45.83
24	Palermo	0.324	286.44	307.70	0.135	0.418	6.73	50.13
25	Palermo	0.345	238.00	259.80	0.045	0.131	12.03	46.14
26	Palermo	0.209	360.00	402.40	0.001	0.005	28.72	41.93
27	Palermo	0.215	287.00	351.00	0.003	0.015	25.35	39.77
28	Palermo	0.169	369.00	433.00	0.000	0.003	32.77	39.80
29	Palermo	0.192	328.00	392.00	0.001	0.007	28.88	39.87
30	Palermo	0.227	405.30	453.80	0.001	0.005	26.85	41.52
31	Palermo	0.239	308.25	356.30	0.004	0.017	24.57	37.29
32	Palermo	0.310	404.10	452.10	0.005	0.016	24.70	41.48
33	Palermo	0.333	44.63	63.80	0.261	0.785	4.27	22.74

Tabella 7: Parametri Termo-Fisici Strutture Opache Verticali (Palermo)

3.2.2 Strutture Opache Orizzontali ed Inclinate

Di seguito vengono riportati i principali parametri termo-fisici delle diverse tipologie di solai e coperture progettate per ogni località. Sono presenti coperture non ventilate e ventilate, solai contro-terra, solai di sottotetto e solai di interpiano. Questi ultimi, dividendo zone termiche riscaldate, sono esclusi dalle verifiche sulla trasmittanza termica limite.

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Total Internal Heat Capacity	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Attenuation f_a	Time Shift ϕ	Areal Internal Heat Capacity k_J
-	-	[W/(m²K)]	[kg/m²]	[kJ/m²K]	[W/(m²K)]	[-]	[h]	[kJ/(m²K)]
Roofs (Isolated)								
21	Milan	0.203	316.87	329.60	0.028	0.140	13.02	63.42
22	Milan	0.198	56.85	72.20	0.186	0.939	2.50	19.64
23	Milan	0.202	402.80	433.00	0.045	0.222	8.33	91.36
24	Milan	0.200	278.16	279.50	0.067	0.333	9.97	82.72
25	Milan	0.190	46.68	53.20	0.135	0.707	5.23	6.38
Roofs (Not Isolated)								
26	Milan	0.700	399.20	427.70	0.176	0.252	6.47	91.71
27	Milan	0.678	29.18	35.20	0.671	0.991	0.46	2.44
Ground Floor								
1	Milan	0.249	1370.60	1372.20	0.007	0.027	18.37	62.66
Internal Floor								
1	Milan	0.354	403.80	390.70	0.039	0.111	12.17	77.36
2	Milan	0.479	339.20	305.70	0.156	0.326	7.59	78.48
Sub-Roofing Floor (Isolated)								
1	Milan	0.245	363.60	351.40	0.038	0.155	11.24	58.05
2	Milan	0.244	70.50	71.20	0.195	0.798	4.25	5.96
Sub-Roofing Floor (Not Isolated)								
3	Milan	1.239	360.00	337.50	0.413	0.333	8.40	32.52
4	Milan	1.242	57.50	57.60	1.16	0.934	1.28	7.54

Tabella 8: Parametri Termo-Fisici Strutture Opache Orizzontali ed Inclinate (Milano)

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Total Internal Heat Capacity	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Attenuation f_a	Time Shift ϕ	Areal Internal Heat Capacity k_J
-	-	[W/(m²K)]	[kg/m²]	[kJ/m²K]	[W/(m²K)]	[-]	[h]	[kJ/(m²K)]
Roofs (Isolated)								
25	Rome	0.203	316.87	329.60	0.028	0.140	13.02	63.42
26	Rome	0.198	56.85	72.20	0.186	0.939	2.50	19.64
27	Rome	0.202	402.80	433.00	0.045	0.222	8.33	91.36
28	Rome	0.200	278.16	279.50	0.067	0.333	9.97	82.72
29	Rome	0.212	44.18	506.00	0.167	0.786	4.31	6.08
Roofs (Not Isolated)								
30	Rome	0.700	399.20	427.70	0.176	0.252	6.47	91.71
31	Rome	0.678	29.18	35.20	0.671	0.991	0.46	2.44
Ground Floor								
1	Rome	0.269	1370.30	1371.80	0.007	0.027	18.29	62.56
Internal Floor								
1	Rome	0.354	403.80	390.70	0.039	0.111	12.17	77.36
2	Rome	0.479	339.20	305.70	0.156	0.326	7.59	78.48
Sub-Roofing Floor (Isolated)								
1	Rome	0.273	363.00	340.10	0.029	0.107	11.35	34.40
2	Rome	0.265	68.25	68.90	0.217	0.836	3.49	5.24
Sub-Roofing Floor (Not Isolated)								
3	Rome	1.239	360.00	337.50	0.413	0.333	8.04	32.52
4	Rome	1.242	57.50	57.60	1.16	0.934	1.28	7.54

Tabella 9: Parametri Termo-Fisici Strutture Opache Orizzontali ed Inclinate (Roma)

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Total Internal Heat Capacity	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Attenuation f_a	Time Shift ϕ	Areal Internal Heat Capacity k_J
-	-	[W/(m²K)]	[kg/m²]	[kJ/m²K]	[W/(m²K)]	[-]	[h]	[kJ/(m²K)]
Roofs (Isolated)								
35	Palermo	0.203	316.87	329.60	0.028	0.140	13.02	63.42
36	Palermo	0.198	56.85	72.20	0.186	0.939	2.50	19.64
37	Palermo	0.202	402.80	433.00	0.045	0.222	8.33	91.36
38	Palermo	0.260	311.87	324.50	0.043	0.166	11.40	63.71
39	Palermo	0.258	55.65	70.40	0.249	0.966	1.78	18.83
40	Palermo	0.264	401.60	431.20	0.061	0.229	7.67	91.41
41	Palermo	0.200	278.16	279.50	0.067	0.333	9.97	82.72
42	Palermo	0.262	276.96	277.80	0.090	0.345	6.28	82.66
43	Palermo	0.254	39.43	45.80	0.229	0.899	3.06	4.79
Roofs (Not Isolated)								
44	Palermo	0.700	399.20	427.70	0.176	0.252	6.47	91.71
45	Palermo	0.678	29.18	35.20	0.671	0.991	0.46	2.44
Ground Floor								
1	Palermo	0.353	1369.40	1370.50	0.01	0.028	18.05	62.15
Internal Floor								
1	Palermo	0.354	403.80	390.70	0.039	0.111	12.17	77.36
2	Palermo	0.479	339.20	305.70	0.156	0.326	7.59	78.48
Sub-Roofing Floor (Isolated)								
1	Palermo	0.362	362.10	349.20	0.064	0.169	10.43	58.45
2	Palermo	0.361	63.25	63.80	0.325	0.901	2.34	4.20
Sub-Roofing Floor (Not Isolated)								
3	Palermo	1.239	360.00	337.50	0.413	0.333	8.40	32.52
4	Palermo	1.242	57.50	57.60	1.16	0.934	1.28	7.54

Tabella 10: Parametri Termo-Fisici Strutture Opache Orizzontali ed Inclinate (Palermo)

3.2.3 Strutture Trasparenti

Per la zona climatica E sono state utilizzate delle finestre a doppio vetro con telaio in PVC e intercapedine con gas argon, mentre per le zone climatiche D e B l'intercapedine è stata realizzata con l'aria. Anche le finestre rispettano i valori limite di trasmittanza necessari per poter usufruire delle detrazioni fiscali inerenti al Superbonus 110%. Il fattore di trasmissione solare totale è pari a 0,35, come stabilito dal DM 26 giugno 2015. Inoltre, al fine di verificare l'area solare equivalente estiva (verifica necessaria per la certificazione energetica), si sono poste come schermature solari ad ogni finestra delle tende interne di colore bianco.

		Milan (Argon)				**Rome (Air)**				**Palermo (Air)**			
Window Width	Window Height	U_f	U_g	U_{max}	U_w	U_f	U_g	U_{max}	U_w	U_f	U_g	U_{max}	U_w
[m]	[m]	[W/m²K]				[W/m²K]				[W/m²K]			
1.20	1.40	1.20	1.03	1.30	**1.29**	1.20	1.56	1.67	**1.67**	2.10	2.06	2.60	**2.56**
1.80	1.40	1.20	1.03	1.30	**1.26**	1.20	1.56	1.67	**1.67**	2.10	2.06	2.60	**2.54**
2.00	1.40	1.20	1.03	1.30	**1.25**	1.20	1.56	1.67	**1.64**	2.10	2.06	2.60	**2.53**
1.20	2.40	1.20	1.03	1.30	**1.27**	1.20	1.56	1.67	**1.67**	2.10	2.06	2.60	**2.56**

Tabella 11: Caratteristiche Geometriche e Trasmittanze Termiche per ogni Località Considerata

3.2.4 Strutture Opache Fisse Utilizzate per la Villetta Senza Sottotetto (Caso Studio 1)

Di seguito vengono riportati i principali parametri termo-fisici delle strutture fisse utilizzate nel caso studio 1, ovvero le coperture, i solai contro-terra e i solai interpiano. Nelle simulazioni effettuate varieranno solo le strutture opache verticali.

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Total Internal Heat Capacity	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Attenuation f_a	Time Shift ϕ	Areal Internal Heat Capacity k_J
-	-	[W/(m²K)]	[kg/m²]	[kJ/m²K]	[W/(m²K)]	[-]	[h]	[kJ/(m²K)]
Roofs (Isolated)								
24	Milan	0.200	278.16	279.50	0.067	0.333	9.97	82.72
28	Rome	0.200	278.16	279.50	0.067	0.333	9.97	82.72
40	Palermo	0.264	401.60	431.20	0.061	0.229	7.67	91.41
Ground Floor								
1	Milan	0.249	1370.60	1372.20	0.007	0.027	18.37	62.66
1	Rome	0.269	1370.30	1371.80	0.007	0.027	18.29	62.56
1	Palermo	0.353	1369.40	1370.50	0.01	0.028	18.05	62.15
Internal Floor								
1	Milan	0.354	403.80	390.70	0.039	0.111	12.17	77.36
1	Rome	0.354	403.80	390.70	0.039	0.111	12.17	77.36
1	Palermo	0.354	403.80	390.70	0.039	0.111	12.17	77.36

Tabella 12: Parametri Termo-Fisici Strutture Fisse Utilizzate per ogni Località Climatica (Caso Studio 1)

3.2.5 Strutture Opache Fisse Utilizzate per la Villetta con Solaio di Sottotetto Isolato e Copertura Non Isolata (Caso Studio 2)

Di seguito vengono riportati i principali parametri termo-fisici delle strutture fisse utilizzate nel caso studio 2, ovvero le coperture, i solai contro-terra, i solai di sottotetto e i solai interpiano. Nelle simulazioni effettuate varieranno solo le strutture opache verticali. I solai di sottotetto isolati rispettano i valori di trasmittanza termica limite imposti per usufruire dell'incentivo fiscale, mentre la copertura non isolata rispetta il valore di trasmittanza limite di 0,80 W/m^{2}K imposto dal DM 26 giugno 2015 per le strutture opache che delimitano verso l'ambiente esterno ambienti non riscaldati adiacenti agli ambienti climatizzati.

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Total Internal Heat Capacity	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Attenuation f_a	Time Shift ϕ	Areal Internal Heat Capacity k_J
-	-	[W/(m²K)]	[kg/m²]	[kJ/m²K]	[W/(m²K)]	[-]	[h]	[kJ/(m²K)]
Roofs (Not Isolated)								
26	Milan	0.700	399.20	427.70	0.176	0.252	6.47	91.71
30	Rome	0.700	399.20	427.70	0.176	0.252	6.47	91.71
44	Palermo	0.700	399.20	427.70	0.176	0.252	6.47	91.71
Ground Floor								
1	Milan	0.249	1370.60	1372.20	0.007	0.027	18.37	62.66
1	Rome	0.269	1370.30	1371.80	0.007	0.027	18.29	62.56
1	Palermo	0.353	1369.40	1370.50	0.01	0.028	18.05	62.15
Internal Floor								
1	Milan	0.354	403.80	390.70	0.039	0.111	12.17	77.36
1	Rome	0.354	403.80	390.70	0.039	0.111	12.17	77.36
1	Palermo	0.354	403.80	390.70	0.039	0.111	12.17	77.36
Sub-Roofing Floor (Isolated)								
1	Milan	0.245	363.60	351.40	0.038	0.155	11.24	58.05
1	Rome	0.273	363.00	340.10	0.029	0.107	11.35	34.40
1	Palermo	0.362	362.10	349.20	0.064	0.169	10.43	58.45

Tabella 13: Parametri Termo-Fisici Strutture Fisse Utilizzate per ogni Località Climatica (Caso Studio 2)

3.2.6 Strutture Opache Fisse Utilizzate per la Villetta con Solaio di Sottotetto Non Isolato e Copertura Isolata (Caso Studio 3)

Di seguito vengono riportati i principali parametri termo-fisici delle strutture fisse utilizzate nel caso studio 3, ovvero le coperture, i solai contro-terra, i solai di sottotetto e i solai interpiano. Nelle simulazioni effettuate varieranno solo le strutture opache verticali.

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Total Internal Heat Capacity	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Attenuation f_a	Time Shift ϕ	Areal Internal Heat Capacity k_J
-	-	[W/(m²K)]	[kg/m²]	[kJ/m²K]	[W/(m²K)]	[-]	[h]	[kJ/(m²K)]
Roofs (Isolated)								
24	Milan	0.200	278.16	279.50	0.067	0.333	9.97	82.72
28	Rome	0.200	278.16	279.50	0.067	0.333	9.97	82.72
40	Palermo	0.264	401.60	431.20	0.061	0.229	7.67	91.41
Ground Floor								
1	Milan	0.249	1370.60	1372.20	0.007	0.027	18.37	62.66
1	Rome	0.269	1370.30	1371.80	0.007	0.027	18.29	62.56
1	Palermo	0.353	1369.40	1370.50	0.01	0.028	18.05	62.15
Internal Floor								
1	Milan	0.354	403.80	390.70	0.039	0.111	12.17	77.36
1	Rome	0.354	403.80	390.70	0.039	0.111	12.17	77.36
1	Palermo	0.354	403.80	390.70	0.039	0.111	12.17	77.36
Sub-Roofing Floor (Not Isolated)								
3	Milan	1.239	360.00	337.50	0.413	0.333	8.40	32.52
3	Rome	1.239	360.00	337.50	0.413	0.333	8.40	32.52
3	Palermo	1.239	360.00	337.50	0.413	0.333	8.40	32.52

Tabella 14: Parametri Termo-Fisici Strutture Fisse Utilizzate per ogni Località Climatica (Caso Studio 3)

3.2.7 Strutture Opache Utilizzate per l'Edificio Massivo

Nelle analisi proposte nel capitolo successivo si farà riferimento alla differenza tra un edificio caratterizzato da strutture massive e un edificio caratterizzato da strutture leggere. Per struttura massiva si intende una struttura dotata di elevata massa superficiale ed elevata capacità termica interna kj, mentre per struttura leggera si intende una struttura dotata di ridotta massa superficiale e ridotta capacità termica interna kj. Di seguito vengono riportati i principali parametri termo-fisici delle strutture utilizzate per simulare gli edifici definiti massivi.

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Total Internal Heat Capacity	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Attenuation f_a	Time Shift ϕ	Areal Internal Heat Capacity k_J
-	-	[W/(m²K)]	[kg/m²]	[kJ/m²K]	[W/(m²K)]	[-]	[h]	[kJ/(m²K)]
Roofs (Isolated)								
24	Milan	0.200	278.16	279.50	0.067	0.333	9.97	82.72
28	Rome	0.200	278.16	279.50	0.067	0.333	9.97	82.72
40	Palermo	0.264	401.60	431.20	0.061	0.229	7.67	91.41
Roofs (Not Isolated)								
26	Milan	0.700	399.20	427.70	0.176	0.252	6.47	91.71
30	Rome	0.700	399.20	427.70	0.176	0.252	6.47	91.71
44	Palermo	0.700	399.20	427.70	0.176	0.252	6.47	91.71
Ground Floor								
1	Milan	0.249	1370.60	1372.20	0.007	0.027	18.37	62.66
1	Rome	0.269	1370.30	1371.80	0.007	0.027	18.29	62.56
1	Palermo	0.353	1369.40	1370.50	0.01	0.028	18.05	62.15
Internal Floor								
1	Milan	0.354	403.80	390.70	0.039	0.111	12.17	77.36
1	Rome	0.354	403.80	390.70	0.039	0.111	12.17	77.36
1	Palermo	0.354	403.80	390.70	0.039	0.111	12.17	77.36
Sub-Roofing Floor (Isolated)								
1	Milan	0.245	363.60	351.40	0.038	0.155	11.24	58.05
1	Rome	0.273	363.00	340.10	0.029	0.107	11.35	34.40
1	Palermo	0.362	362.10	349.20	0.064	0.169	10.43	58.45
Sub-Roofing Floor (Not Isolated)								
3	Milan	1.239	360.00	337.50	0.413	0.333	8.40	32.52
3	Rome	1.239	360.00	337.50	0.413	0.333	8.40	32.52
3	Palermo	1.239	360.00	337.50	0.413	0.333	8.40	32.52
Walls								
7	Milan	0.218	227.80	275.80	0.007	0.031	21.92	34.56
7	Rome	0.239	228.86	257.10	0.007	0.031	21.10	35.77
11	Palermo	0.356	274.85	303.00	0.018	0.050	18.55	40.55

Tabella 15: Parametri Termo-Fisici Strutture Massive Utilizzate per ogni Località Climatica (Caso Studio 2 e Caso Studio 3)

3.2.8 Strutture Opache Utilizzate per L'Edificio Leggero

Di seguito vengono riportati i principali parametri termo-fisici delle strutture utilizzate per simulare gli edifici definiti leggeri.

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Total Internal Heat Capacity	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Attenuation f_a	Time Shift ϕ	Areal Internal Heat Capacity k_J
-	-	[W/(m²K)]	[kg/m²]	[kJ/m²K]	[W/(m²K)]	[-]	[h]	[kJ/(m²K)]
Roofs (Isolated)								
25	Milan	0.190	46.68	53.20	0.135	0.707	5.23	6.38
29	Rome	0.212	44.18	506.00	0.167	0.786	4.31	6.08
43	Palermo	0.254	39.43	45.80	0.229	0.899	3.06	4.79
Roofs (Not Isolated)								
27	Milan	0.678	29.18	35.20	0.671	0.991	0.46	2.44
31	Rome	0.678	29.18	35.20	0.671	0.991	0.46	2.44
45	Palermo	0.678	29.18	35.20	0.671	0.991	0.46	2.44
Ground Floor								
1	Milan	0.249	1370.60	1372.20	0.007	0.027	18.37	62.66
1	Rome	0.269	1370.30	1371.80	0.007	0.027	18.29	62.56
1	Palermo	0.353	1369.40	1370.50	0.01	0.028	18.05	62.15
Internal Floor								
2	Milan	0.479	339.20	305.70	0.156	0.326	7.59	78.48
2	Rome	0.479	339.20	305.70	0.156	0.326	7.59	78.48
2	Palermo	0.479	339.20	305.70	0.156	0.326	7.59	78.48
Sub-Roofing Floor (Isolated)								
2	Milan	0.244	70.50	71.20	0.195	0.798	4.25	5.96
2	Rome	0.265	68.25	68.90	0.217	0.836	3.49	5.24
2	Palermo	0.361	63.25	63.80	0.325	0.901	2.34	4.20
Sub-Roofing Floor (Not Isolated)								
4	Milan	1.242	57.50	57.60	1.16	0.934	1.28	7.54
4	Rome	1.242	57.50	57.60	1.16	0.934	1.28	7.54
4	Palermo	1.242	57.50	57.60	1.16	0.934	1.28	7.54
Walls								
19	Milan	0.216	52.13	71.50	0.12	0.554	6.67	21.63
23	Rome	0.245	49.63	68.90	0.154	0.631	5.87	22.12
33	Palermo	0.333	44.63	63.80	0.261	0.785	4.27	22.74

Tabella 16: Parametri Termo-Fisici Strutture Massive Utilizzate per ogni Località Climatica (Caso Studio 2 e Caso Studio 3)

3.3 Impianti e Ventilazione

3.3.1 Metodo Semi Stazionario (UNI TS 11300)

Per il calcolo semi stazionario è stato utilizzato un impianto di riscaldamento a pavimento radiante che sfrutta come generatore una pompa di calore aria-acqua a compressione di gas con motore elettrico. La pompa di calore viene utilizzata anche per la produzione di acqua calda sanitaria, insieme ai pannelli solari termici di superficie captante pari a 2,50 m^2. Tali pannelli sono orientati a sud con inclinazione di 45°. Per la produzione di energia elettrica sono stati installati 20 m^2 di pannelli solari fotovoltaici in silicio policristallino, anch'essi orientati a sud con inclinazione di 45°. È stato predisposto un sistema di ventilazione meccanica controllata con tasso di ricambio d'aria pari a 0,50 [1/h]. In alcune analisi il tasso di ricambio d'aria verrà portato a 0,10 [1/h]. Anche le zone termine non riscaldate sono caratterizzate da un tasso di ricambio d'aria pari a 0,50, solo nell'analisi dove si dovrà determinare l'influenza delle infiltrazioni nel sottotetto il tasso di ricambio d'aria di tale zona termica verrà portato a 0,70 [1/h].

3.3.2 Metodo Dinamico (UNI EN ISO 52016)

Per il calcolo mediante il metodo dinamico orario si sono utilizzate due configurazioni di impianto: nella prima l'impianto è dotato di potenza infinita per la stima dei consumi energetici, mentre nella seconda configurazione l'impianto avrà potenza nulla così da valutare il comfort adattivo in funzione della temperatura operativa dei singoli locali. Nel caso di impianto a potenza infinita, in accordo con il DPR 412/93, si sono stabilite le seguenti ore di accensione dell'impianto di riscaldamento in funzione della zona climatica:

- Per la zona climatica E, l'impianto di riscaldamento risulterà acceso dal 15 ottobre al 15 aprile, dalle ore 6:00 alle ore 13:00 e dalle ore 17:00 alle ore 24:00.
- Per la zona climatica D, l'impianto di riscaldamento risulterà acceso dal 1 novembre al 15 aprile, dalle ore 6:00 alle ore 12:00 e dalle ore 18:00 alle ore 24:00.
- Per la zona climatica B, l'impianto di riscaldamento risulterà acceso dal 1 dicembre al 31 marzo, dalle ore 7:00 alle ore 11:00 e dalle ore 19:00 alle ore 23:00.

La temperatura di set-point invernale è stata fissata pari a 20°C, mentre per il periodo estivo è stata fissata pari a 26°C. Poiché non vi è nessuna normativa vigente che regoli l'accensione dell'impianto di raffrescamento, esso viene considerato acceso ogni qualvolta si necessiti di ridurre la temperatura secondo il set-point estivo. Anche in questo caso la ventilazione è stata predisposta fissando un tasso di ricambio d'aria pari a 0,50 [1/h]. Nell'analisi sul comfort adattivo il tasso di ricambio d'aria nelle ore notturne verrà portato a 0,70 [1/h].

4. Analisi Risultati: Metodo Dinamico UNI EN ISO 52016-1

4.1 Valutazione del Fabbisogno di Energia Utile di una Villetta Unifamiliare Senza Sottotetto Con Copertura Isolata

Attraverso l'applicazione del metodo dinamico riportato nella norma UNI EN ISO 52016 sono stati determinati, al variare delle strutture opache esterne e delle località, i fabbisogni di energia utile per il riscaldamento e il raffrescamento associati all'edificio oggetto di studio. Si analizzeranno i risultati per le diverse località considerate, quali Milano, Roma e Palermo, andando a relazionare i fabbisogni di energia utile con la trasmittanza termica, osservando la variazione dei risultati anche in funzione di altri parametri. Verranno inoltre riportati i valori di temperatura esterna massima e minima, la radiazione invernale ed estiva su piano orizzontale e il valore medio mensile dell'irradianza sul piano orizzontale nel mese di massima insolazione estiva, in modo da poter considerare i risultati in funzione del diverso contesto climatico.

4.1.1. Milano

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Total Internal Heat Capacity	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Attenuation f_a	Time Shift ϕ	Areal Internal Heat Capacity k_J	Heating Energy Need $Q_{H,nd}$	Cooling Energy Need $Q_{C,nd}$
-	-	[W/(m²K)]	[kg/m²]	[kJ/m²K]	[W/(m²K)]	[-]	[h]	[kJ/(m²K)]	[kWh]	[kWh]
Walls										
1	Milan	0.208	253.50	301.70	0.004	0.020	21.68	37.76	3822.34	2056.77
2	Milan	0.228	315.00	350.40	0.004	0.019	23.10	44.12	3969.80	2036.43
3	Milan	0.214	373.50	421.50	0.001	0.006	28.78	37.91	3866.30	2050.62
4	Milan	0.207	230.40	270.50	0.007	0.033	18.35	39.18	3812.71	2056.99
5	Milan	0.197	355.60	395.70	0.002	0.009	23.60	41.90	3714.39	2053.42
6	Milan	0.230	432.00	480.00	0.001	0.005	29.93	39.57	3989.51	2037.24
7	Milan	0.218	227.80	275.80	0.007	0.031	21.92	34.56	3910.50	2056.61
8	Milan	0.231	278.64	327.10	0.056	0.241	10.70	42.74	3903.49	2057.32
9	Milan	0.163	292.99	341.00	0.001	0.006	29.22	34.36	3459.73	2090.30
10	Milan	0.211	385.06	364.30	0.003	0.014	22.55	41.41	3831.27	2047.52
11	Milan	0.208	444.15	408.50	0.001	0.004	29.08	38.86	3809.04	2051.68
12	Milan	0.206	288.24	310.30	0.079	0.383	7.68	49.84	3706.94	2073.09
13	Milan	0.214	239.80	262.40	0.023	0.109	12.88	45.83	3871.25	2050.50
14	Milan	0.209	360.00	402.40	0.001	0.005	28.72	41.93	3818.21	2050.85
15	Milan	0.215	287.00	351.00	0.003	0.015	25.35	39.77	3880.22	2053.96
16	Milan	0.169	369.00	433.00	0.000	0.003	32.77	39.80	3497.94	2081.00
17	Milan	0.192	328.00	392.00	0.001	0.007	28.88	39.87	3685.04	2067.26
18	Milan	0.227	405.30	453.80	0.001	0.005	26.85	41.52	3954.73	2034.51
19	Milan	0.216	52.13	71.50	0.12	0.554	6.67	21.63	3909.99	2072.53
20	Milan	0.216	52.13	71.50	0.12	0.554	6.67	21.63	4034.31	2033.05
Roofs										
21	Milan	0.203	316.87	329.60	0.028	0.140	13.02	63.42	3914.21	2061.78
22	Milan	0.198	56.85	72.20	0.186	0.939	2.50	19.64	3896.17	2078.86
23	Milan	0.202	402.80	433.00	0.045	0.222	8.33	91.36	3910.50	2056.61
24	Milan	0.200	278.16	279.50	0.067	0.333	9.97	82.72	3906.33	2061.96

Tabella 17: Caratteristiche Strutture Opache e Fabbisogni di Energia Utile (Milano)

Nei grafici realizzati vengono riportati sull'asse delle ordinate i fabbisogni di energia, divisi tra invernali ed estivi, mentre sull'asse delle ascisse vengono riportate le trasmittanze termiche. Si è inoltre introdotta una linea di tendenza lineare per evidenziare l'andamento dei risultati. Nel grafico 1, riportante il fabbisogno di

energia utile per il riscaldamento, si può notare come all'aumentare della trasmittanza termica aumenti anche il fabbisogno, infatti, essendo la trasmittanza termica il flusso di calore che attraversa una struttura di 1 m^2 di superficie con una differenza di temperatura tra i lati della struttura stessa pari ad 1 K, all'aumentare della trasmittanza aumenteranno le dispersioni di calore verso l'esterno, di conseguenza si avrà un aumento di fabbisogno. Osservando la dispersione dei punti rispetto alla linea di tendenza possiamo notare quanto segue: i punti che si trovano al di sotto della linea di tendenza appartengono prevalentemente a strutture con capacità termica interna (k_j) più elevata, mentre i punti al di sopra appartengo a strutture con capacità termica interna più bassa, questo significa che per trasmittanze termiche simili avere una capacità termica interna più elevata consente di ridurre il fabbisogno di energia (trovandosi al di sotto della linea di tendenza quei punti corrisponderanno a fabbisogni minori).

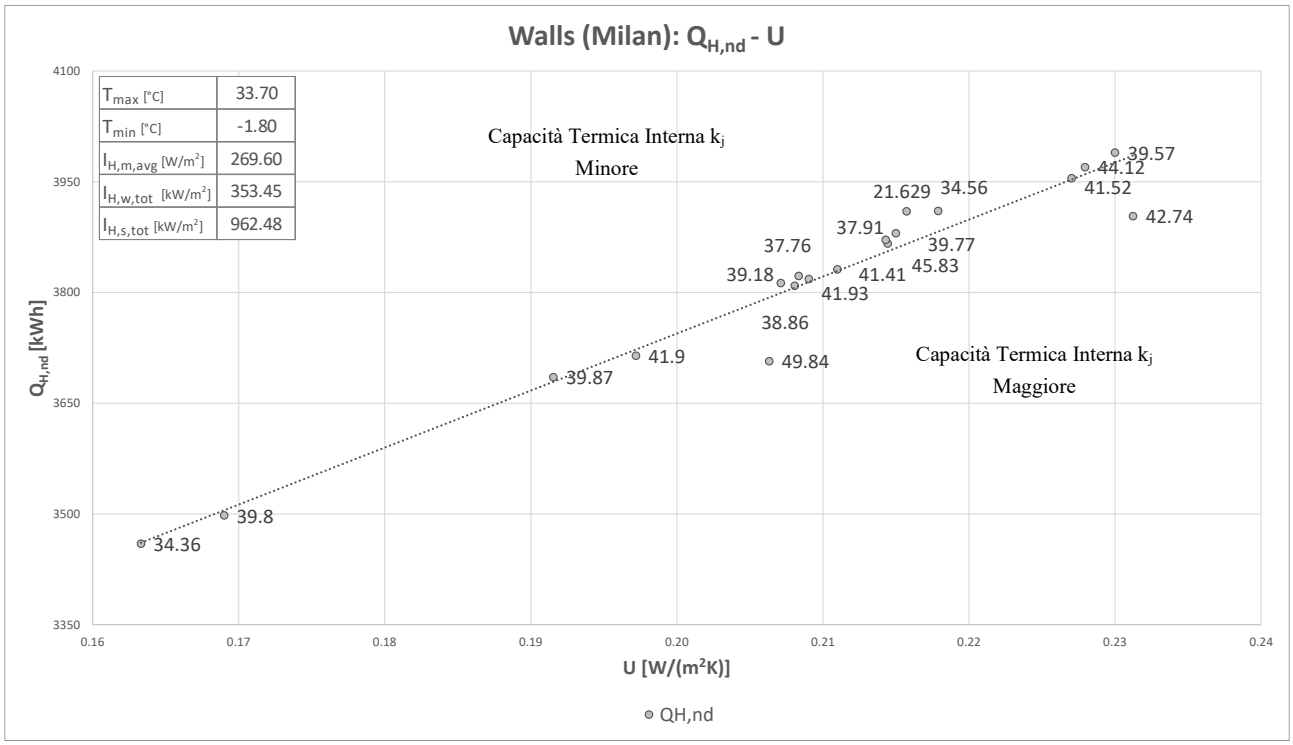

Grafico 1: Rapporto tra Fabbisogno Invernale e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Capacità Termica Interna [kJ/(m2K)]

Nel grafico 2, riportante il fabbisogno di energia utile per il raffrescamento, si può notare come all'aumentare della trasmittanza diminuisca il fabbisogno. A differenza del caso invernale l'andamento dei risultati si inverte, questo perché durante il periodo estivo intervengono maggiormente gli apporti solari (una struttura con trasmittanza termica ridotta disperderà più lentamente il calore a differenza di una struttura con trasmittanza termica elevata), inoltre i parametri dinamici che caratterizzano le strutture hanno un'influenza maggiore nel periodo estivo rispetto al periodo invernale.

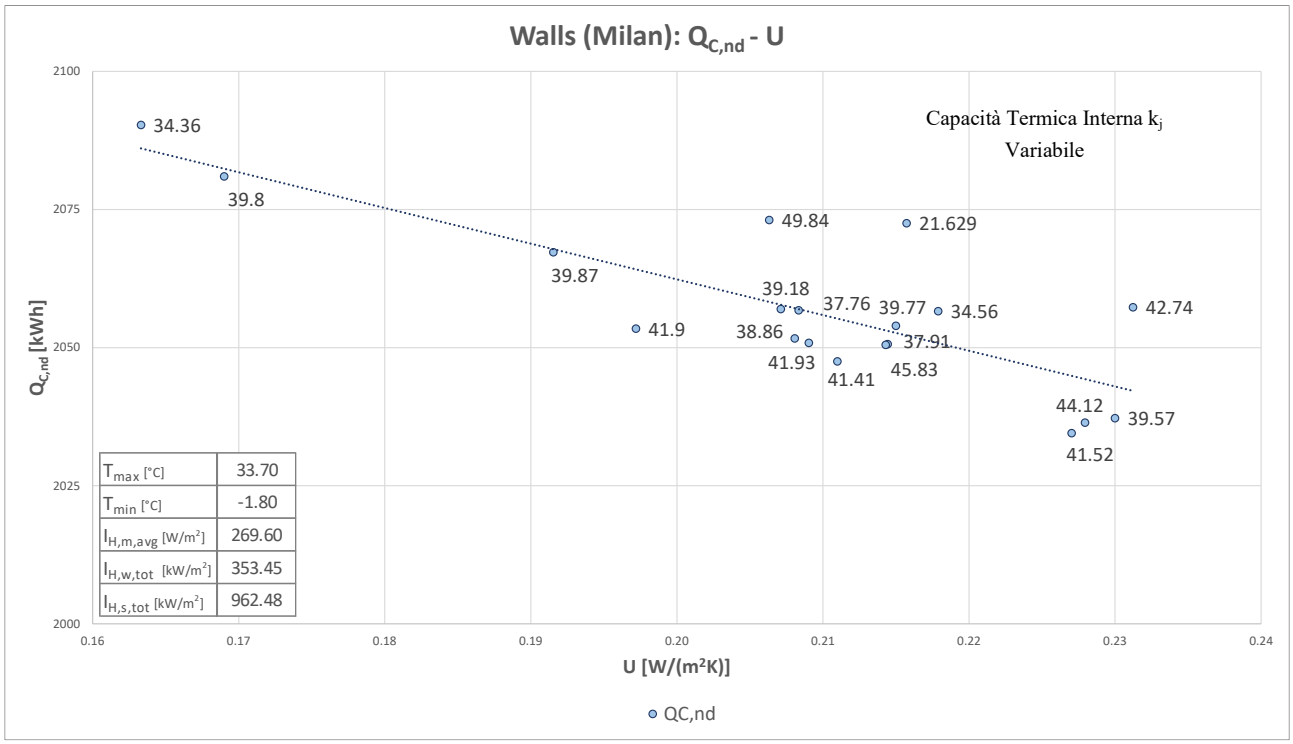

Grafico 2: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Capacità Termica Interna [kJ/(m²K)]

Analizzando il grafico si nota come l'osservazione sulla capacità termica interna introdotta nel periodo invernale non può essere estesa al periodo estivo, infatti i punti che si trovano al di sopra e al di sotto della linea di tendenza hanno capacità termica interna variabile (non si evidenzia una capacità termica maggiore o minore a seconda della posizione dei punti rispetto alla linea di tendenza). Si procede quindi analizzando l'andamento dei risultati in funzione di altri due parametri, cioè la massa superficiale e la trasmittanza termica periodica. Sono stati scelti questi parametri poiché sono riportati all'interno del D.lgs 192/2005 e successive modifiche e integrazioni come requisiti da rispettare al fine di limitare i fabbisogni energetici per la climatizzazione estiva per tutte le località climatiche, ad eccezione della F, nelle quali il valore medio mensile dell'irradianza sul piano orizzontale nel mese di massima insolazione sia maggiore o uguale a 290 W/m^2. In particolare andrà verificato che per tutte le strutture verticali opache il valore della massa superficiale sia superiore a 230 kg/m^2 oppure che il valore del modulo della trasmittanza termica periodica sia inferiore a 0,10 W/m^{2}K, inoltre per le strutture opache orizzontali e inclinate il valore del modulo della trasmittanza termica periodica deve essere inferiore a 0,18 W/m^{2}K. L'obiettivo sarà verificare da un punto di vista qualitativo quanto questi parametri riportati nel contesto normativo influenzino effettivamente il fabbisogno di energia nel periodo estivo.

Nel grafico 3 è possibile osservare come i punti identificati da una massa superficiale maggiore si trovino prevalentemente al di sotto della linea di tendenza, mentre i punti identificati da una massa superficiale minore si trovano al di sopra della linea di tendenza. Questo significa che, a parità di trasmittanza termica, avere una massa superficiale maggiore nel periodo estivo consente di ridurre il fabbisogno di energia utile per il raffrescamento.

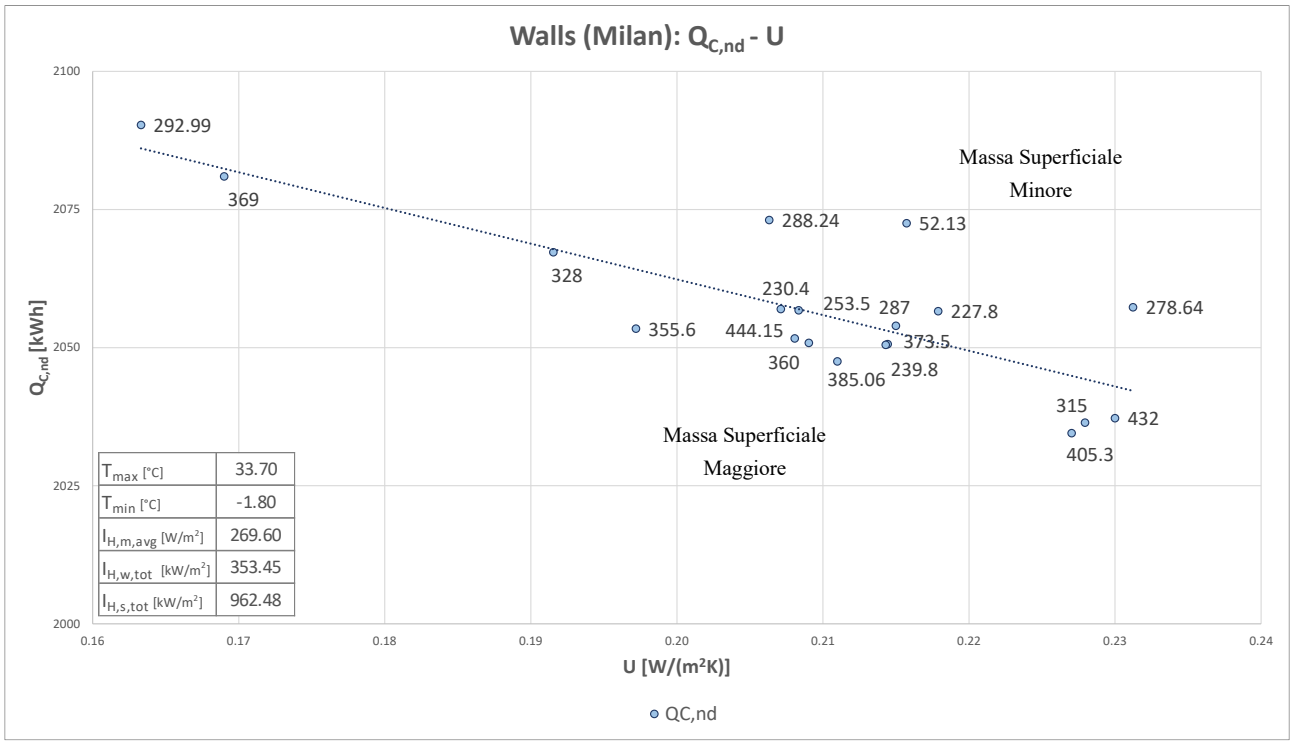

Grafico 3: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Massa Superficiale [kg/m²]

I valori di trasmittanza termica periodica risultano essere simili tra le varie strutture, ma nel grafico 4 è possibile notare che i valori più elevati si trovano al di sopra della linea di tendenza, quindi in generale per trasmittanze termiche simili all'aumentare della trasmittanza termica periodica aumenta anche il fabbisogno di energia.

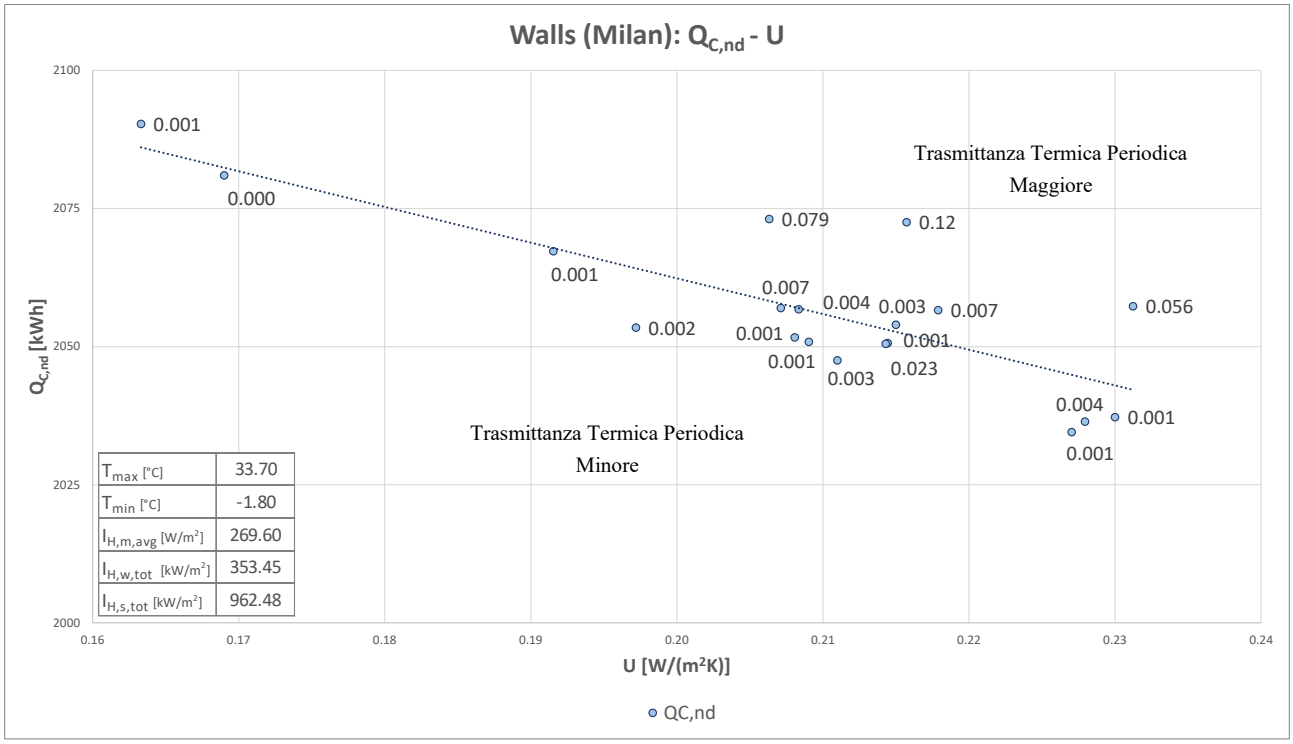

Grafico 4: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Trasmittanza Termica Periodica [W/(m²K)]

Un'ulteriore analisi sulla trasmittanza termica periodica può essere realizzata correlando quest'ultima allo sfasamento, parametro che viene utilizzato come indicatore della prestazione estiva di un edificio sia nel DM 26 giugno 2009 sia nel Protocollo Itaca. Il DM 26 giugno 2009 propone un metodo qualitativo secondo cui in funzione del valore assunto dallo sfasamento è possibile definire la seguente classificazione prestazionale degli edifici volti a contenere il fabbisogno per la climatizzazione estiva:

Sfasamento (ore)	**Attenuazione**	**Prestazioni**	**Qualità prestazionale**
S> 12	Fa<0,15	ottime	I
12 ≥S > 10	0,15≤fa<0,30	buone	II
10 ≥S > 8	0,30≤fa<0,40	medie	III
8 ≥S > 6	0,40≤fa<0,60	sufficienti	IV
6≥S	0,60≤fa	mediocri	V

Tabella 18: Classificazione delle Prestazioni Estive di un Edificio in Funzione dello Sfasamento e del Fattore di Attenuazione

Il Protocollo Itaca invece stabilisce una diversa scala prestazionale, secondo cui per mantenere le condizioni di comfort termico nel periodo estivo lo sfasamento non deve risultare mai inferiore alle 8 ore.

Prestazione quantitativa	Punteggio	Punteggio Raggiunto (*)
Sfasamento 6 ore, attenuazione 0.60	-2	
Sfasamento 7 ore, attenuazione 0.48	-1	
Sfasamento 8 ore, attenuazione 0.40	0	
Sfasamento 9 ore, attenuazione 0,35	1	
Sfasamento 10 ore, attenuazione 0,30	2	
Sfasamento 11 ore, attenuazione 0.20	3	
Sfasamento 12 ore, attenuazione 0.15	4	
Sfasamento 14 ore, attenuazione 0.12	5	

Tabella 19: Scala di Prestazione in Funzione dello Sfasamento e del Fattore di Attenuazione (Protocollo Itaca)

In questo caso i grafici sono stati realizzati riportando sull'asse delle ordinate sempre il fabbisogno di energia utile, mentre sulle ascisse è stato riportato lo sfasamento, individuando per ogni punto la rispettiva trasmittanza termica periodica. Osservando il grafico 5 si nota come all'aumentare dello sfasamento diminuisca il fabbisogno, inoltre per sfasamenti più bassi si hanno trasmittanze termiche periodiche più elevate. La tabella fornita dalla norma infatti associa prestazioni migliori a sfasamenti elevati e fattori di attenuazione ridotti (quindi trasmittanze termiche periodiche non elevate).

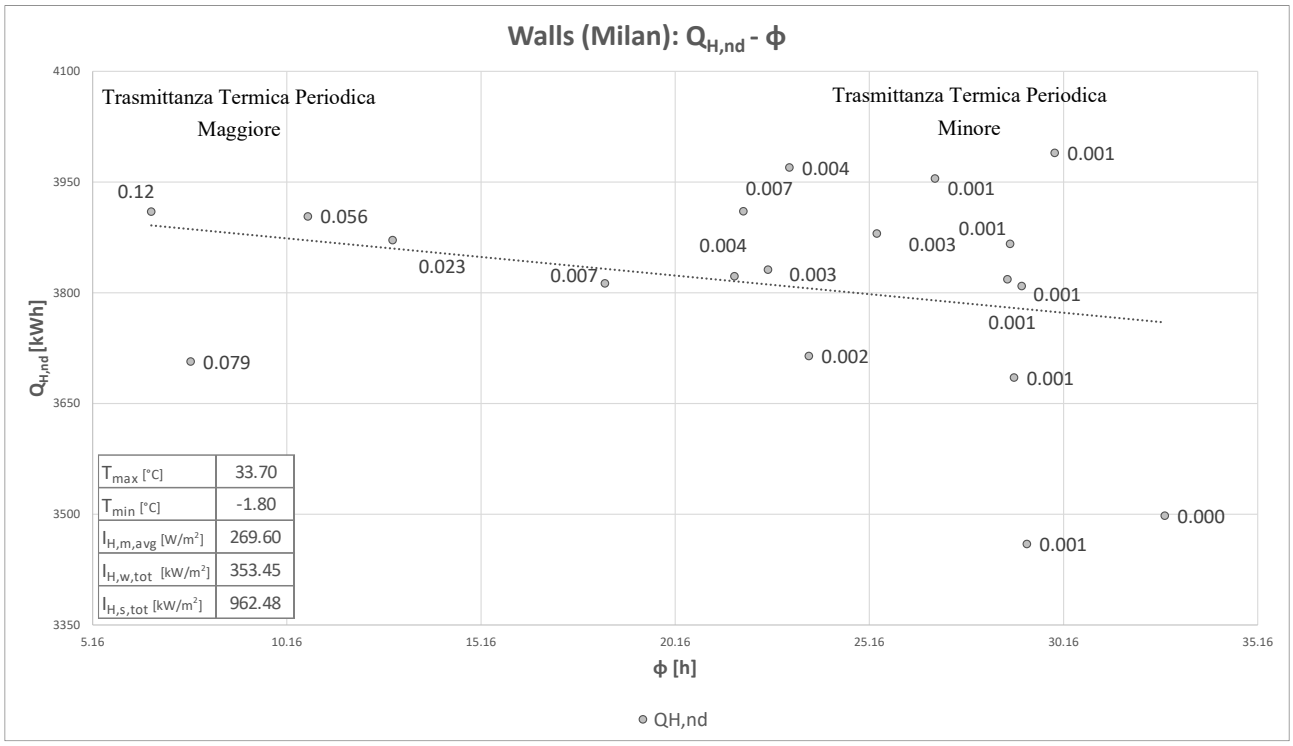

Grafico 5: Rapporto tra Fabbisogno Invernale e Sfasamento, i Numeri Identificano la Trasmittanza Termica Periodica [W/(m²K)]

L'andamento dei risultati coincide sia per il periodo invernale che per quello estivo, con la differenza che la linea di tendenza riferita al fabbisogno invernale ha una maggiore inclinazione rispetto alla linea riferita al fabbisogno estivo. La realizzazione di questi grafici ha confermato quanto già osservato nel grafico 4, ovvero una trasmittanza termica periodica ridotta assicura fabbisogni di energia utili minori.

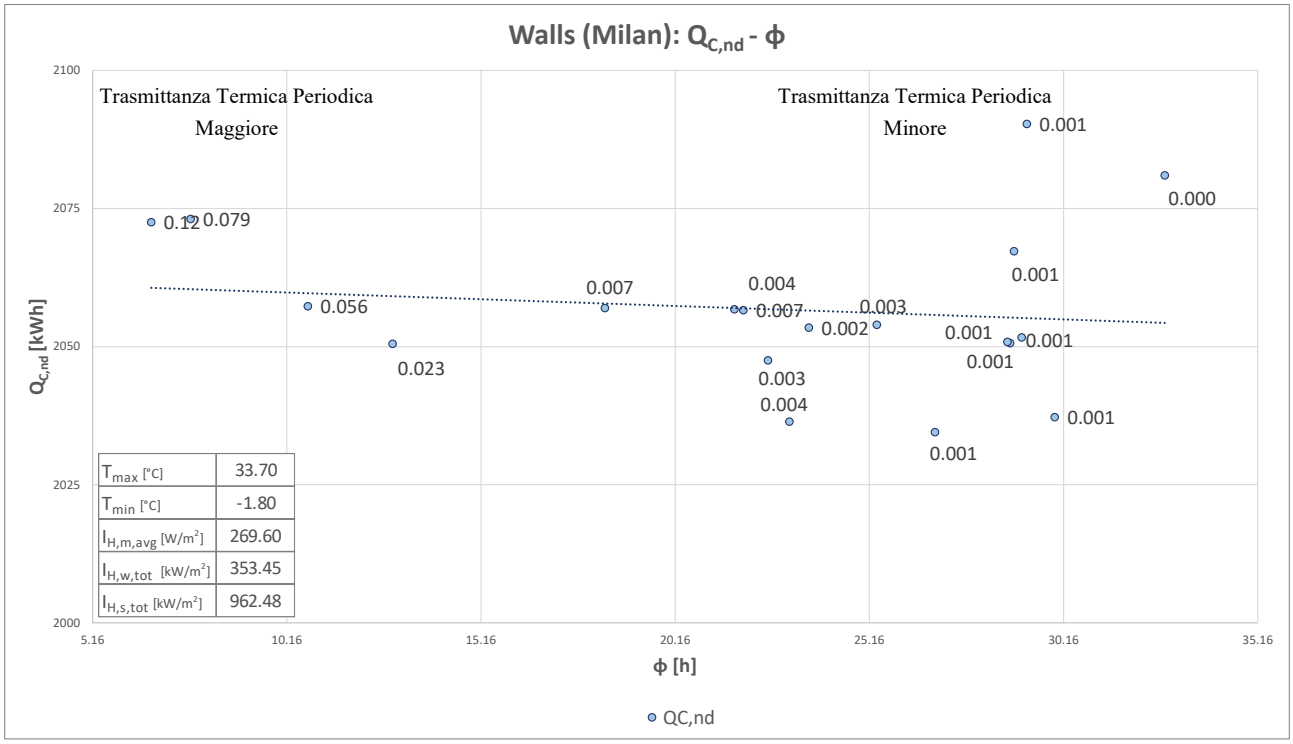

Grafico 6: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Sfasamento, i Numeri Identificano la Trasmittanza Termica Periodica [W/(m²K)]

In conclusione, per la località di Milano, si può osservare che:

Nel periodo invernale il parametro che più influenza il fabbisogno è sicuramente la trasmittanza termica. Un altro parametro su cui intervenire per garantire un fabbisogno invernale ridotto sarà la capacità termica interna, poiché all'aumentare di questo parametro il fabbisogno di energia si riduce. Strutture con trasmittanza termica ridotta e capacità termica interna elevata garantiscono un fabbisogno energetico invernale minore.

Altri parametri, oltre alla trasmittanza termica, che influenzano il fabbisogno nel periodo estivo sono la massa superficiale e della trasmittanza termica periodica. Strutture con massa superficiale elevata e trasmittanza termica periodica ridotta permettono di garantire un fabbisogno energetico estivo minore.

4.1.2 Roma

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Total Internal Heat Capacity	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Attenuation f_a	Time Shift ϕ	Areal Internal Heat Capacity k_J	Heating Energy Need $Q_{H,nd}$	Cooling Energy Need $Q_{C,nd}$
-	-	[W/(m²K)]	[kg/m²]	[kJ/m²K]	[W/(m²K)]	[-]	[h]	[kJ/(m²K)]	[kWh]	[kWh]
Walls										
1	Rome	0.208	253.50	301.70	0.004	0.020	21.68	37.76	938.98	6163.68
2	Rome	0.228	315.00	350.40	0.004	0.019	23.10	44.12	1030.98	6059.74
3	Rome	0.214	373.50	421.50	0.001	0.006	28.78	37.91	983.68	6099.17
4	Rome	0.207	230.40	270.50	0.007	0.033	18.35	39.18	955.19	6115.94
5	Rome	0.197	355.60	395.70	0.002	0.009	23.60	41.90	876.35	6170.91
6	Rome	0.230	432.00	480.00	0.001	0.005	29.93	39.57	1045.96	6060.52
7	Rome	0.239	228.86	257.10	0.007	0.031	21.10	35.77	1067.13	6112.50
8	Rome	0.218	227.80	275.80	0.007	0.031	21.92	34.56	989.18	6153.82
9	Rome	0.231	278.64	327.10	0.056	0.241	10.70	42.74	1003.89	6100.82
10	Rome	0.163	292.99	341.00	0.001	0.006	29.22	34.36	779.80	6220.60
11	Rome	0.238	265.09	313.10	0.006	0.026	22.70	36.17	1068.14	6109.88
12	Rome	0.211	385.06	364.30	0.003	0.014	22.55	41.41	960.40	6097.55
13	Rome	0.243	444.15	421.10	0.002	0.010	26.95	38.85	1103.60	6040.33
14	Rome	0.208	444.15	408.50	0.001	0.004	29.08	38.86	951.85	6108.03
15	Rome	0.206	288.24	310.30	0.079	0.383	7.68	49.84	900.86	6150.20
16	Rome	0.214	239.80	262.40	0.023	0.109	12.88	45.83	957.54	6141.75
17	Rome	0.209	360.00	402.40	0.001	0.005	28.72	41.93	955.88	6104.25
18	Rome	0.215	287.00	351.00	0.003	0.015	25.35	39.77	992.80	6102.32
19	Rome	0.169	369.00	433.00	0.000	0.003	32.77	39.80	794.64	6197.55
20	Rome	0.192	328.00	392.00	0.001	0.007	28.88	39.87	869.13	6197.77
21	Rome	0.227	405.30	453.80	0.001	0.005	26.85	41.52	1024.13	6060.24
22	Rome	0.239	308.25	356.30	0.004	0.017	24.57	37.29	1092.52	6054.21
23	Rome	0.245	49.63	68.90	0.154	0.631	5.87	22.12	1145.93	6080.31
24	Rome	0.245	49.63	68.90	0.154	0.631	5.87	22.12	1294.00	5953.68
Roofs										
25	Rome	0.203	316.87	329.60	0.028	0.140	13.02	63.42	1077.90	6127.05
26	Rome	0.198	56.85	72.20	0.186	0.939	2.50	19.64	1113.86	6122.62
27	Rome	0.202	402.80	433.00	0.045	0.222	8.33	91.36	1067.13	6112.50
28	Rome	0.200	278.16	279.50	0.067	0.333	9.97	82.72	1096.07	6075.04

Tabella 20: Caratteristiche Strutture Opache e Fabbisogni di Energia Utile (Roma)

Come per Milano sono stati realizzati dei grafici relazionando i fabbisogni di energia utile e la trasmittanza termica con un altro parametro, che varierà in funzione dell'analisi (capacità termica interna, massa superficiale e trasmittanza termica periodica). Osservando il grafico 7 è possibile arrivare alle stesse conclusioni associate al grafico 1, cioè che nel periodo invernale il parametro che più influenza il fabbisogno è la trasmittanza termica e che aumentando la capacità termica interna è possibile diminuire il fabbisogno di energia. L'unica differenza apprezzabile con la località di Milano è che nel grafico 5 la dispersione dei punti

rispetto alla linea di tendenza è minore paragonata alla dispersione dei punti che si ha nel grafico 1. Ciò significa che a Milano risulta più evidente che all'aumentare della capacità termica interna si riduce il fabbisogno, perché i punti con capacità termica interna più elevata (o più bassa) sono molto più lontani dalla linea di tendenza rispetto ai punti del grafico 5. Si riesce comunque anche per Roma ad apprezzare l'osservazione nel periodo invernale sulla capacità termica interna, essa risulta solamente meno evidente.

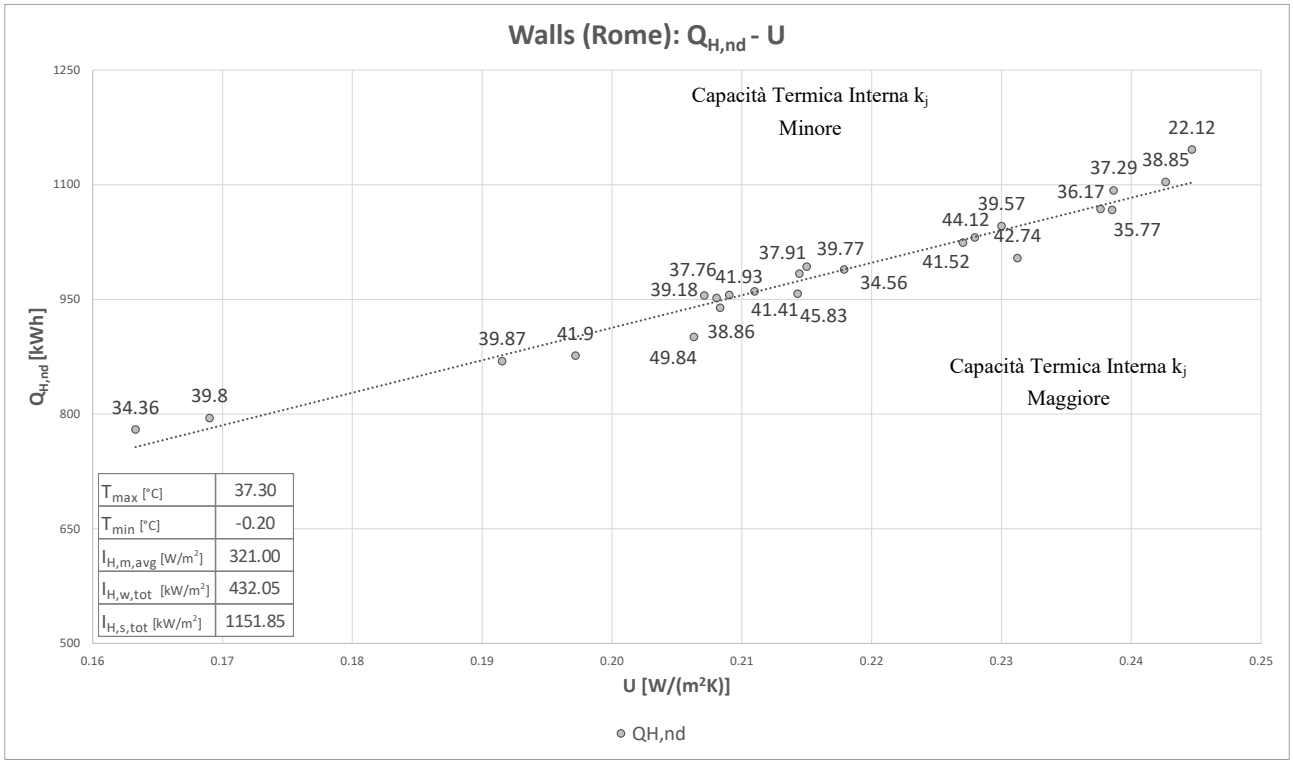

Grafico 7: Rapporto tra Fabbisogno Invernale e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Capacità Termica Interna [kJ/(m²K)]

Anche per Roma si può notare come all'aumentare della trasmittanza termica diminuisca il fabbisogno di energia per il raffrescamento (grafico 8), inoltre risulta di nuovo impossibile estendere l'osservazione sulla capacità termica interna introdotta nel periodo invernale per il periodo estivo, poiché i punti che si trovano al di sopra e al di sotto della linea di tendenza hanno capacità termica interna variabile.

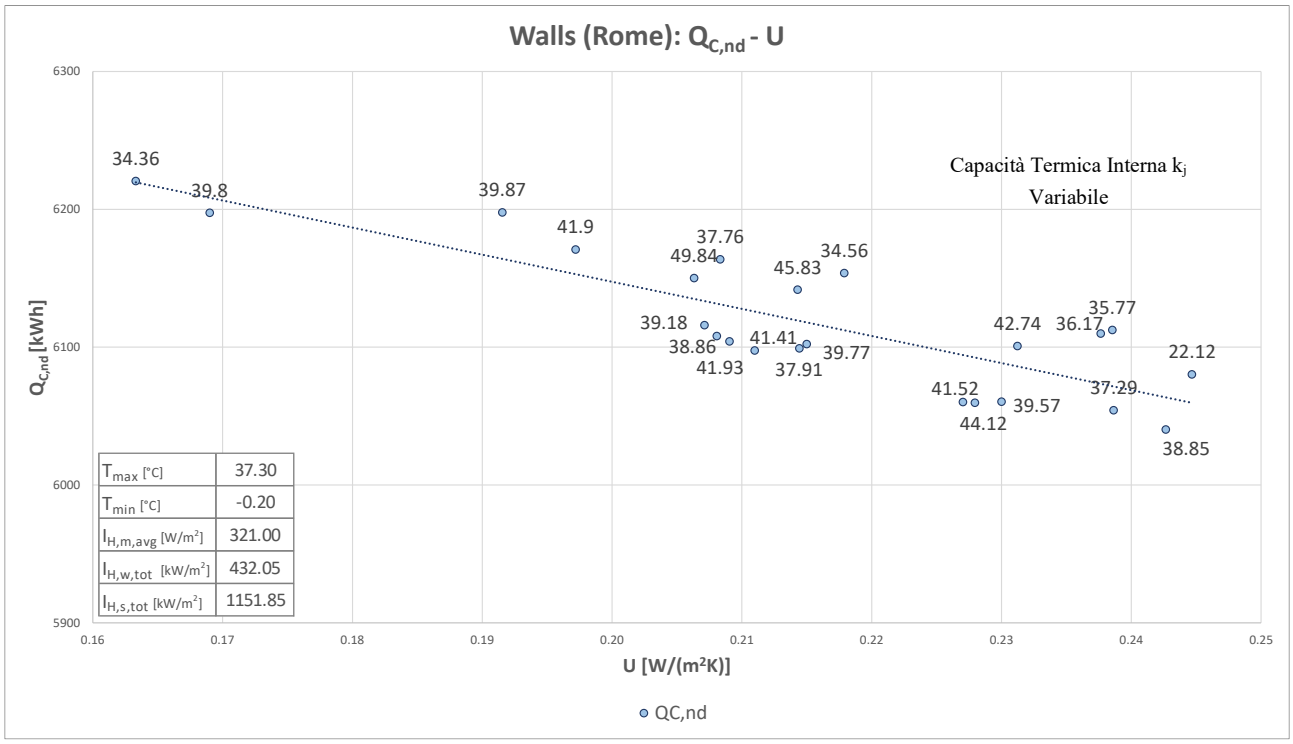

Grafico 8: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Capacità Termica Interna [kJ/(m²K)]

Analizzando i grafici che riportano la massa superficiale e la trasmittanza termica periodica si arriva alle medesime conclusioni commentate su Milano, ovvero che una massa superficiale elevata e una trasmittanza termica periodica ridotta consentono di diminuire il fabbisogno di energia estivo.

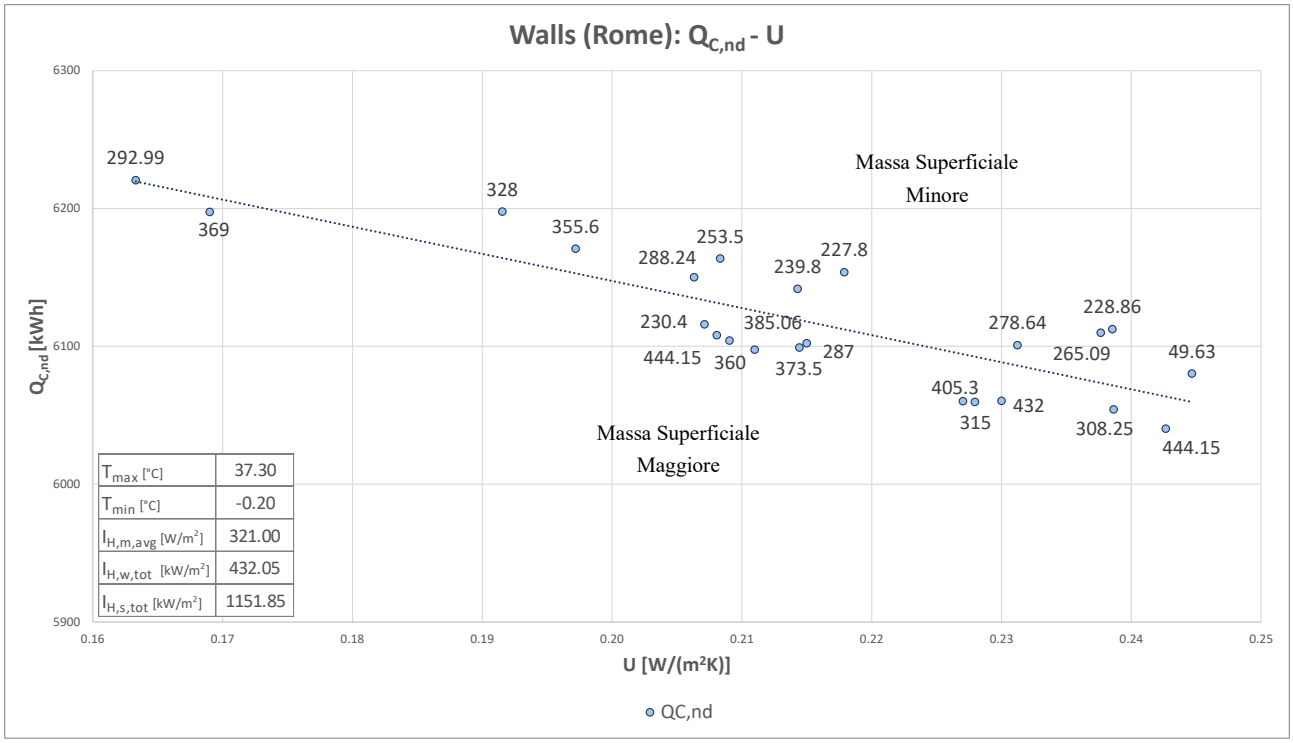

Grafico 9: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Massa Superficiale [kg/m²]

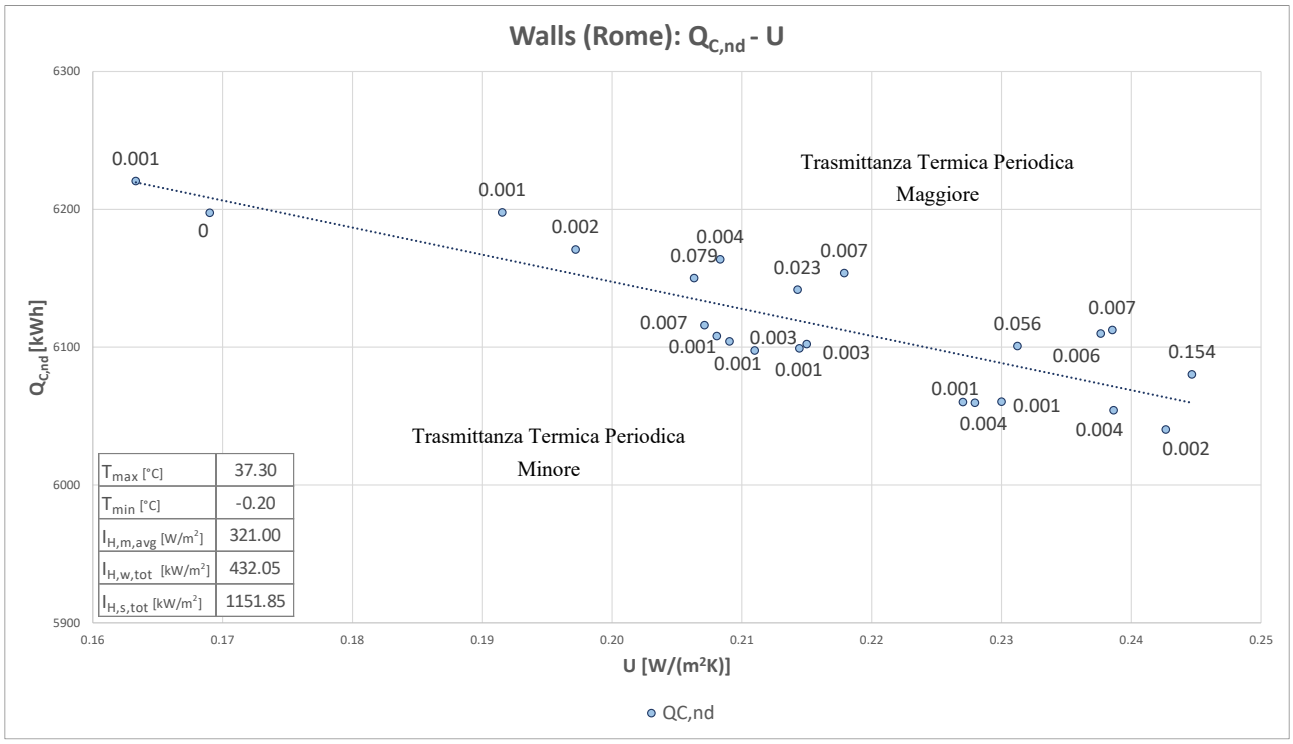

Grafico 10: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Trasmittanza Termica Periodica [W/(m²K)]

Analizzando i grafici riferiti allo sfasamento si nota che nel periodo estivo (grafico 12) è presente un'inversione di tendenza: si mantiene costante l'aspetto che a sfasamenti minori corrispondono trasmittanze termiche periodiche superiori ma non si può affermare lo stesso rispetto al fabbisogno. Osservando la linea di tendenza sembrerebbe che all'aumentare dello sfasamento aumenti anche il fabbisogno, seppur l'inclinazione della retta sia molto ridotta. In questo caso il grafico più significativo per cogliere l'andamento dei fabbisogni di energia in funzione della trasmittanza termica periodica è il grafico 10.

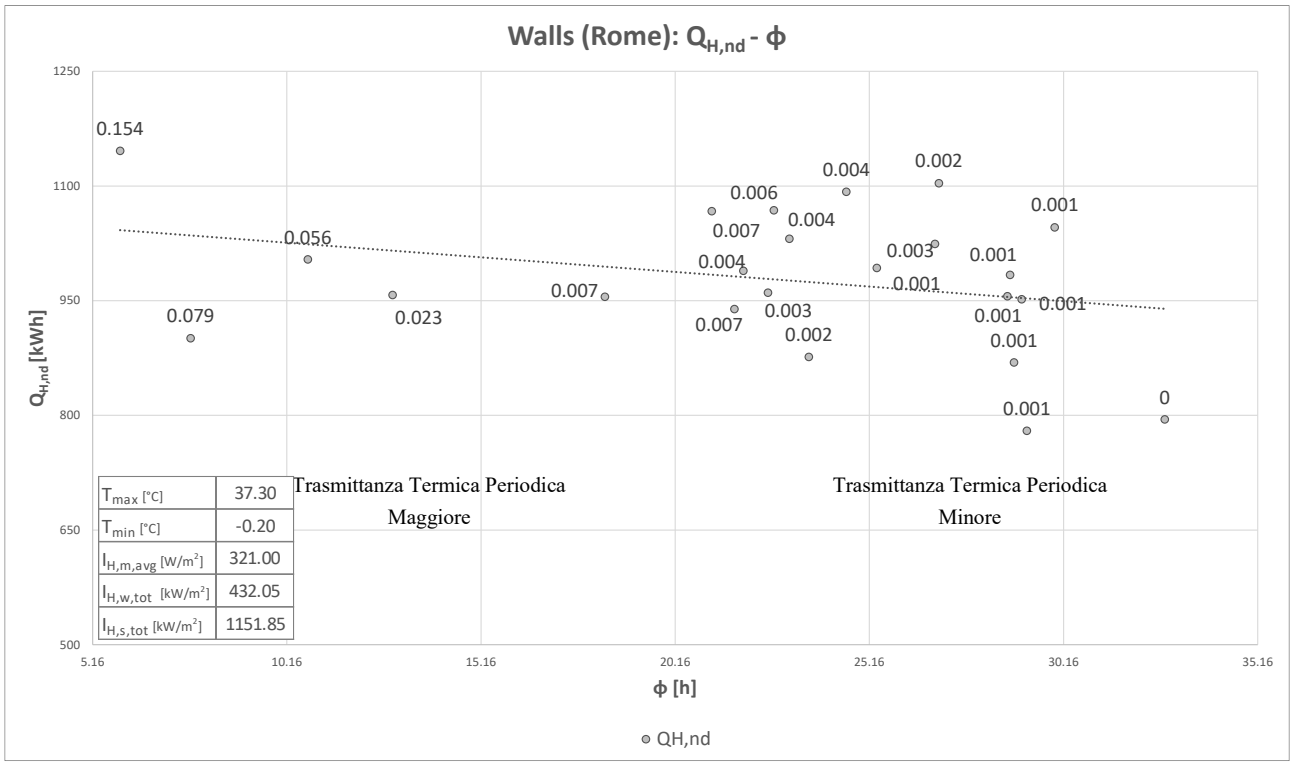

Grafico 11: Rapporto tra Fabbisogno Invernale e Sfasamento, i Numeri Identificano la Trasmittanza Termica Periodica [W/(m²K)]

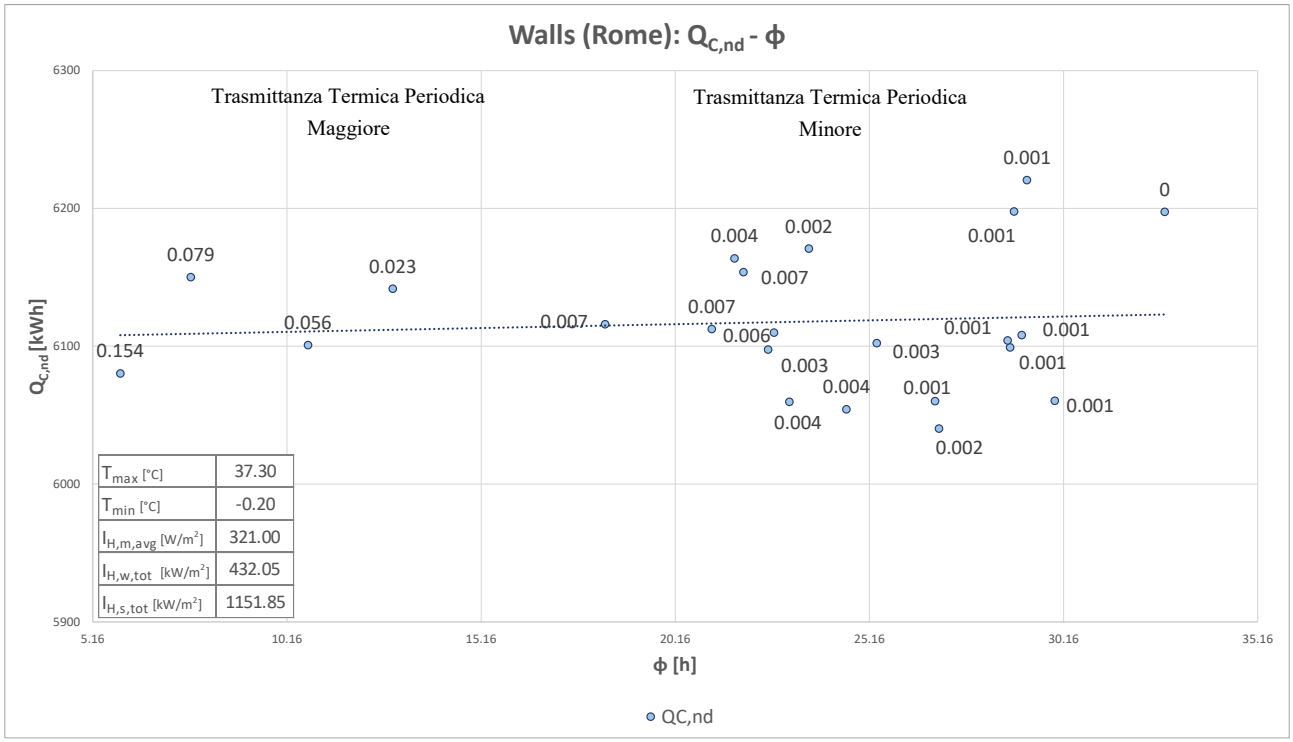

Grafico 12: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Sfasamento, i Numeri Identificano la Trasmittanza Termica Periodica [W/(m²K)]

Le conclusioni studiate sono le medesime individuate nel caso di Milano, con la differenza che per Roma, nel periodo invernale, la dispersione dei punti rispetto alla linea di tendenza risulta essere minore. Questo aspetto può portare ad ipotizzare che una variazione di capacità termica, al fine di diminuire il fabbisogno di energia invernale, sia più efficace per un edificio situato a Milano rispetto ad un edificio situato a Roma.

4.1.3 Palermo

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Total Internal Heat Capacity	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Attenuation f_a	Time Shift ϕ	Areal Internal Heat Capacity k_J	Heating Energy Need $Q_{H,nd}$	Cooling Energy Need $Q_{C,nd}$
-	-	[W/(m²K)]	[kg/m²]	[kJ/m²K]	[W/(m²K)]	[-]	[h]	[kJ/(m²K)]	[kWh]	[kWh]
Walls										
1	Palermo	0.208	253.50	301.70	0.004	0.020	21.68	37.76	1219.15	3106.37
2	Palermo	0.228	315.00	350.40	0.004	0.019	23.10	44.12	1343.99	2982.21
3	Palermo	0.214	373.50	421.50	0.001	0.006	28.78	37.91	1308.74	2988.31
4	Palermo	0.315	246.00	294.00	0.019	0.060	18.75	37.60	1595.68	2999.06
5	Palermo	0.343	294.00	342.00	0.018	0.052	18.18	44.02	1581.03	3118.29
6	Palermo	0.207	230.40	270.50	0.007	0.033	18.35	39.18	1290.58	2989.57
7	Palermo	0.197	355.60	395.70	0.002	0.009	23.60	41.90	1253.45	2981.13
8	Palermo	0.230	432.00	480.00	0.001	0.005	29.93	39.57	1274.05	3102.60
9	Palermo	0.355	228.00	256.20	0.026	0.074	16.83	39.10	1708.00	3002.99
10	Palermo	0.368	353.20	392.20	0.013	0.036	20.83	41.74	1648.93	3126.30
11	Palermo	0.356	274.85	303.00	0.018	0.050	18.55	40.55	1618.77	3125.96
12	Palermo	0.239	228.86	257.10	0.007	0.031	21.10	35.77	1378.29	2994.79
13	Palermo	0.218	227.80	275.80	0.007	0.031	21.92	34.56	1249.90	3112.62
14	Palermo	0.231	278.64	327.10	0.056	0.241	10.70	42.74	1323.68	2993.40
15	Palermo	0.163	292.99	341.00	0.001	0.006	29.22	34.36	1167.92	2995.84
16	Palermo	0.238	265.09	313.10	0.006	0.026	22.70	36.17	1371.84	2993.96
17	Palermo	0.370	271.14	319.30	0.115	0.310	8.68	43.64	1641.52	2999.97
18	Palermo	0.211	385.06	364.30	0.003	0.014	22.55	41.41	1295.41	2983.33
19	Palermo	0.243	444.15	421.10	0.002	0.010	26.95	38.85	1310.21	3106.44
20	Palermo	0.208	444.15	408.50	0.001	0.004	29.08	38.86	1288.07	2985.67
21	Palermo	0.343	375.06	343.30	0.011	0.033	20.35	41.30	1581.74	3121.05
22	Palermo	0.206	288.24	310.30	0.079	0.383	7.68	49.84	1255.65	2992.59
23	Palermo	0.214	239.80	262.40	0.023	0.109	12.88	45.83	1235.55	3102.07
24	Palermo	0.324	286.44	307.70	0.135	0.418	6.73	50.13	1449.74	3115.36
25	Palermo	0.345	238.00	259.80	0.045	0.131	12.03	46.14	1677.28	2994.65
26	Palermo	0.209	360.00	402.40	0.001	0.005	28.72	41.93	1292.08	2984.88
27	Palermo	0.215	287.00	351.00	0.003	0.015	25.35	39.77	1315.08	2991.27
28	Palermo	0.169	369.00	433.00	0.000	0.003	32.77	39.80	1180.56	2989.76
29	Palermo	0.192	328.00	392.00	0.001	0.007	28.88	39.87	1246.71	2990.12
30	Palermo	0.227	405.30	453.80	0.001	0.005	26.85	41.52	1337.92	2980.67
31	Palermo	0.239	308.25	356.30	0.004	0.017	24.57	37.29	1380.08	2991.56
32	Palermo	0.310	404.10	452.10	0.005	0.016	24.70	41.48	1575.70	2989.63
33	Palermo	0.333	44.63	63.80	0.261	0.785	4.27	22.74	1742.44	3040.76
34	Palermo	0.333	44.63	63.80	0.261	0.785	4.27	22.74	1793.61	3014.86
Roofs										
35	Palermo	0.203	316.87	329.60	0.028	0.140	13.02	63.42	1540.76	3090.70
36	Palermo	0.198	56.85	72.20	0.186	0.939	2.50	19.64	1618.42	2988.39
37	Palermo	0.202	402.80	433.00	0.045	0.222	8.33	91.36	1626.50	2960.31
38	Palermo	0.260	311.87	324.50	0.043	0.166	11.40	63.71	1697.82	3002.30
39	Palermo	0.258	55.65	70.40	0.249	0.966	1.78	18.83	1603.25	3154.18
40	Palermo	0.264	401.60	431.20	0.061	0.229	7.67	91.41	1618.77	3125.96
41	Palermo	0.200	278.16	279.50	0.067	0.333	9.97	82.72	1625.01	2964.50
42	Palermo	0.262	276.96	277.80	0.090	0.345	6.28	82.66	1613.68	3128.37

Tabella 21: Caratteristiche Strutture Opache e Fabbisogni di Energia Utile (Palermo)

Il comportamento termico di un edificio situato a Palermo risulta in alcuni aspetti diverso rispetto a quanto riportato per Milano e Roma, sia nel periodo invernale che nel periodo estivo. Analizzando il grafico 13 si nota nuovamente come la trasmittanza termica sia il parametro che più influenza il fabbisogno di energia invernale, infatti all'aumentare della trasmittanza aumenterà l'energia di cui si avrà bisogno. Una differenza rispetto alle località analizzate precedentemente si riscontra sulla capacità termica interna: i punti hanno una capacità termica interna variabile (non è presente un andamento riconoscibile come nei casi precedenti), ciò

implica che la variazione di capacità termica interna influenzerà meno il fabbisogno invernale di un edificio situato a Palermo rispetto ad un edificio situato a Roma o a Milano.

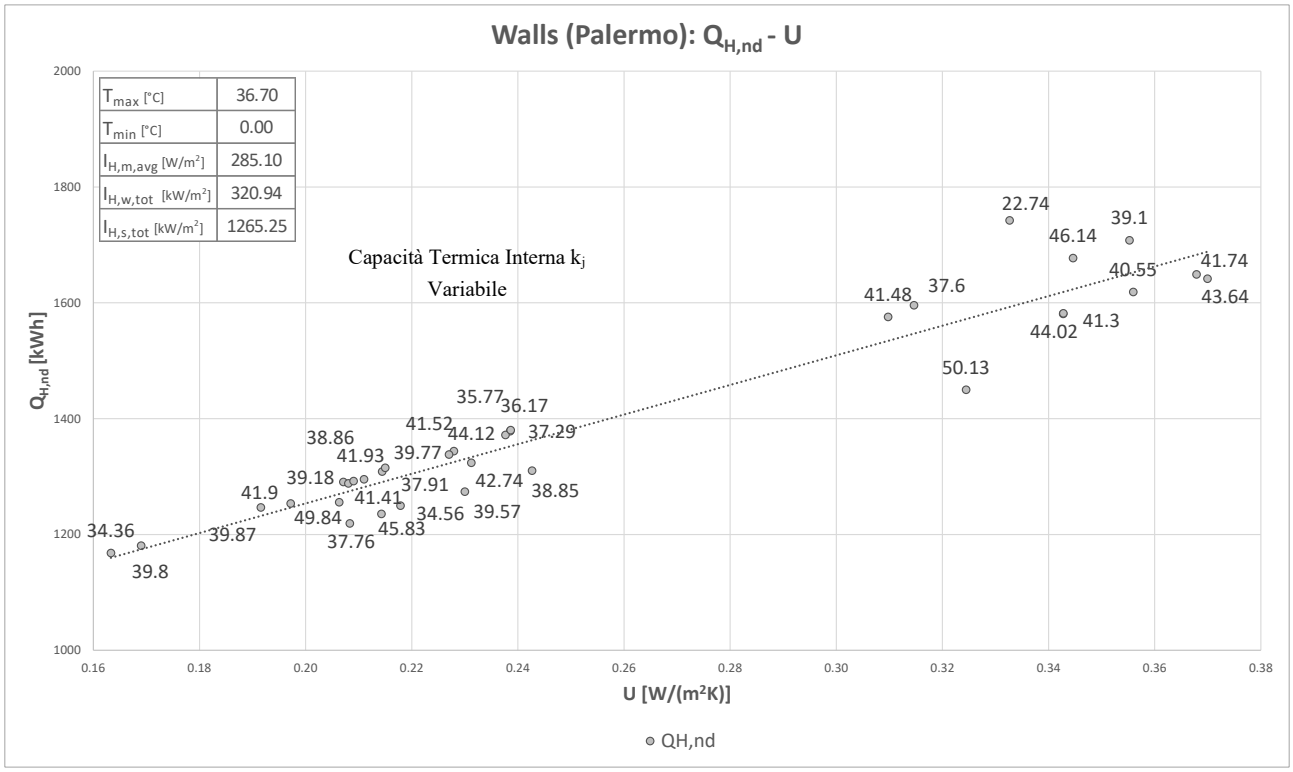

Grafico 13: Rapporto tra Fabbisogno Invernale e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Capacità Termica Interna [kJ/(m²K)]

A differenza dei casi precedenti, dal grafico 14 si può notare come all'aumentare della trasmittanza termica aumenti anche il fabbisogno di energia per il raffrescamento, assumendo quindi un andamento dei risultati inverso rispetto a Roma e Milano. Anche in questo caso i punti che si trovano al di sopra e al di sotto della linea di tendenza hanno capacità termica interna variabile, si procede quindi analizzando l'andamento dei risultati in funzione della massa superficiale e della trasmittanza termica periodica.

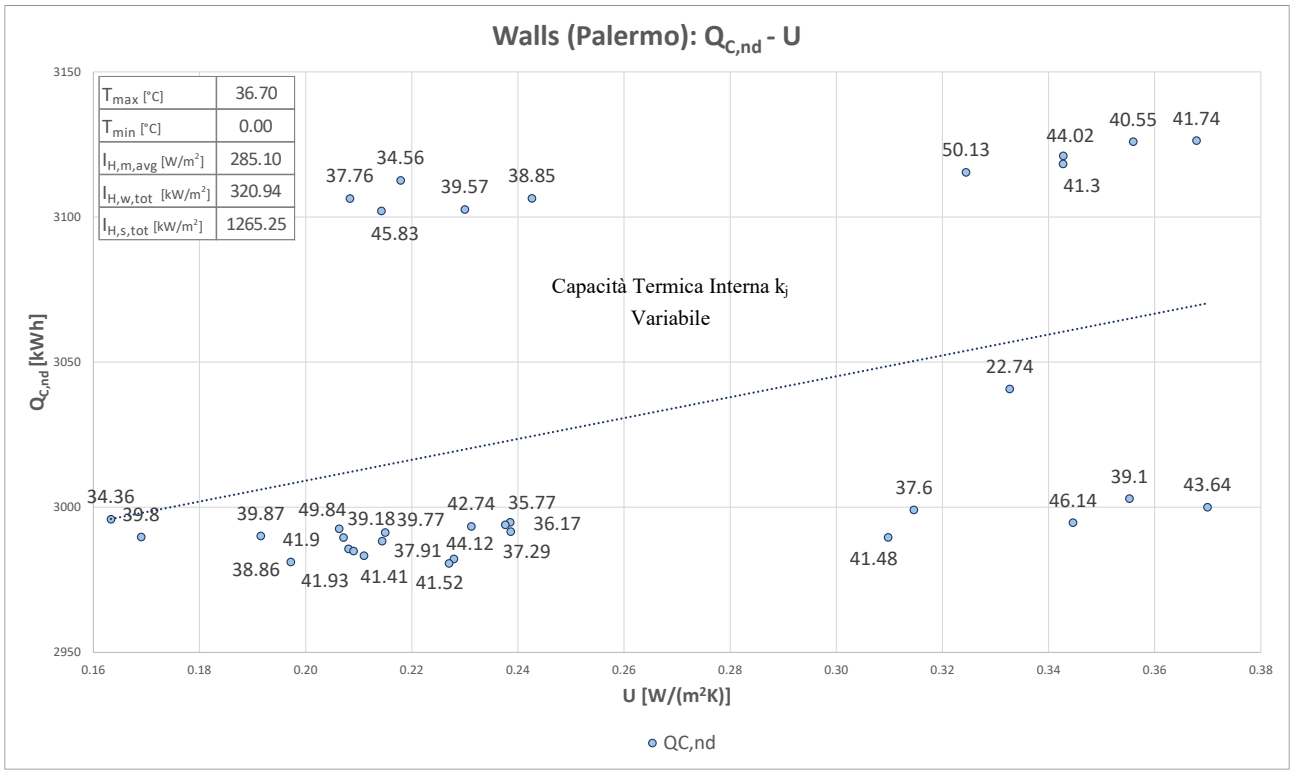

Grafico 14: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Capacità Termica Interna [kJ/(m²K)]

Osservando il grafico 15 si può notare come per trasmittanze termiche basse (identificate dai limiti per le zone climatiche E ed D) all'aumentare della massa superficiale diminuisca il fabbisogno di energia, mentre per trasmittanze termiche elevate (identificate dal limite dalla zona climatica B, quindi esattamente la zona climatica di Palermo) il comportamento si inverte, poiché all'aumentare della massa superficiale aumenta anche il fabbisogno.

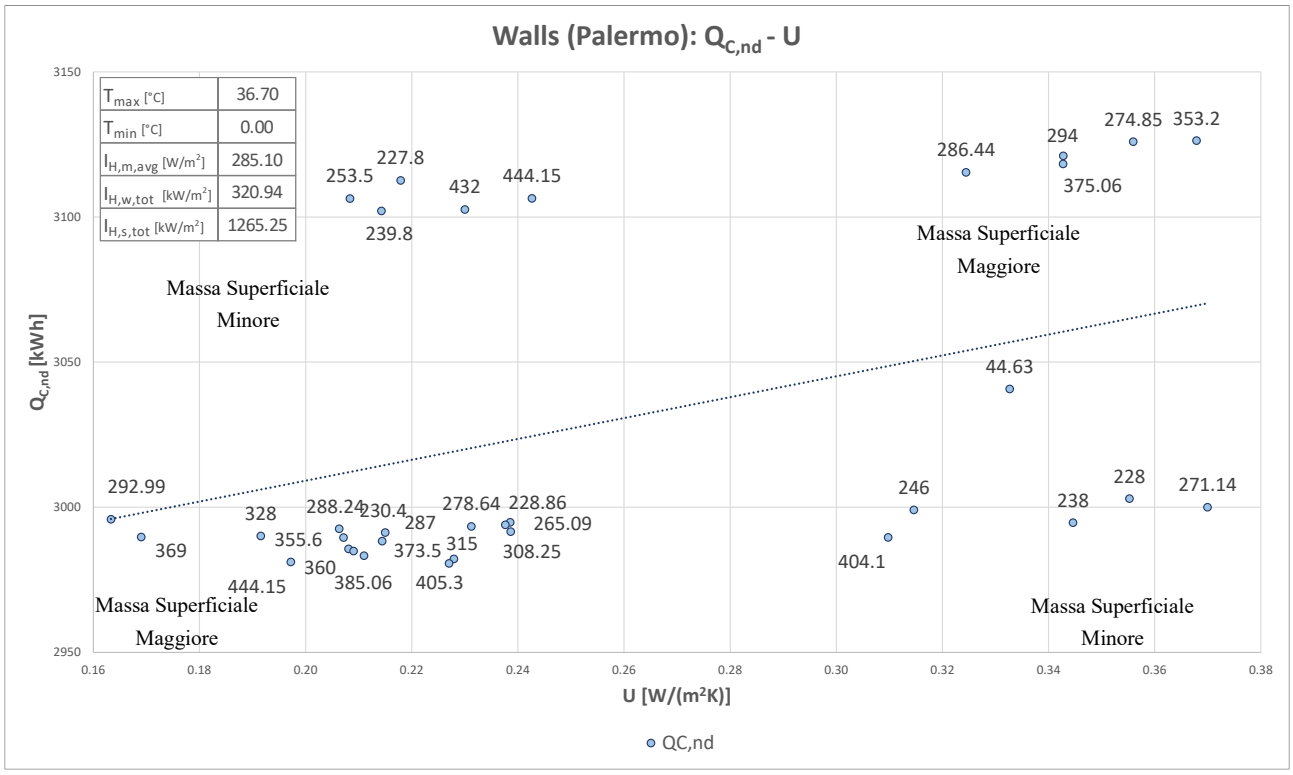

Grafico 15: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Massa Superficiale [kg/m²]

Riguardo all'analisi dei risultati in funzione della trasmittanza termica periodica, osservando il grafico 16 non sembra essere presente un andamento evidente come nel caso di Roma e Milano, si procede quindi analizzando i grafici riferiti allo sfasamento.

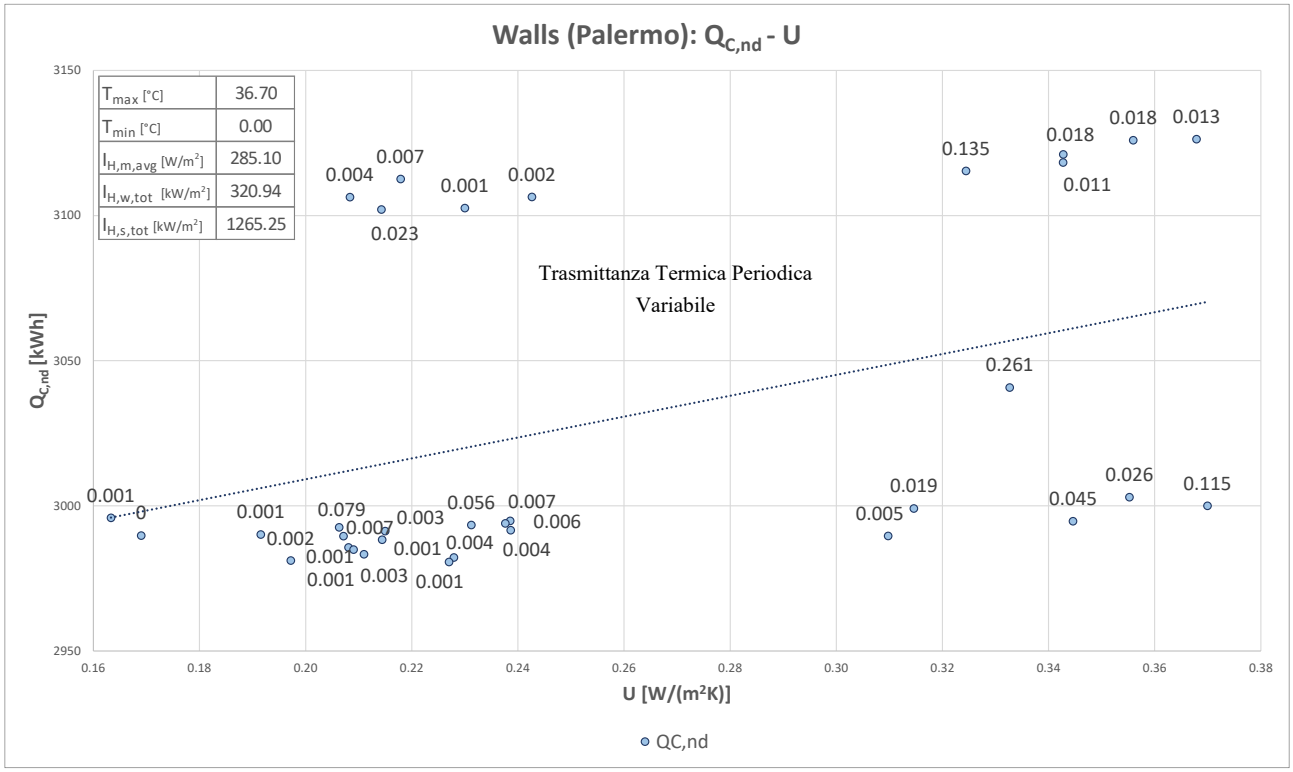

Grafico 16: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Trasmittanza Termica Periodica [W/(m²K)]

Anche in questo caso a sfasamenti elevati corrispondono trasmittanze termiche periodiche ridotte, ma non si riesce a determinare il comportamento del fabbisogno di energia, sia invernale che estivo, in funzione della variazione della trasmittanza termica periodica, di conseguenza non sarà possibile formulare delle osservazioni su quest'ultimo parametro come nei casi precedenti.

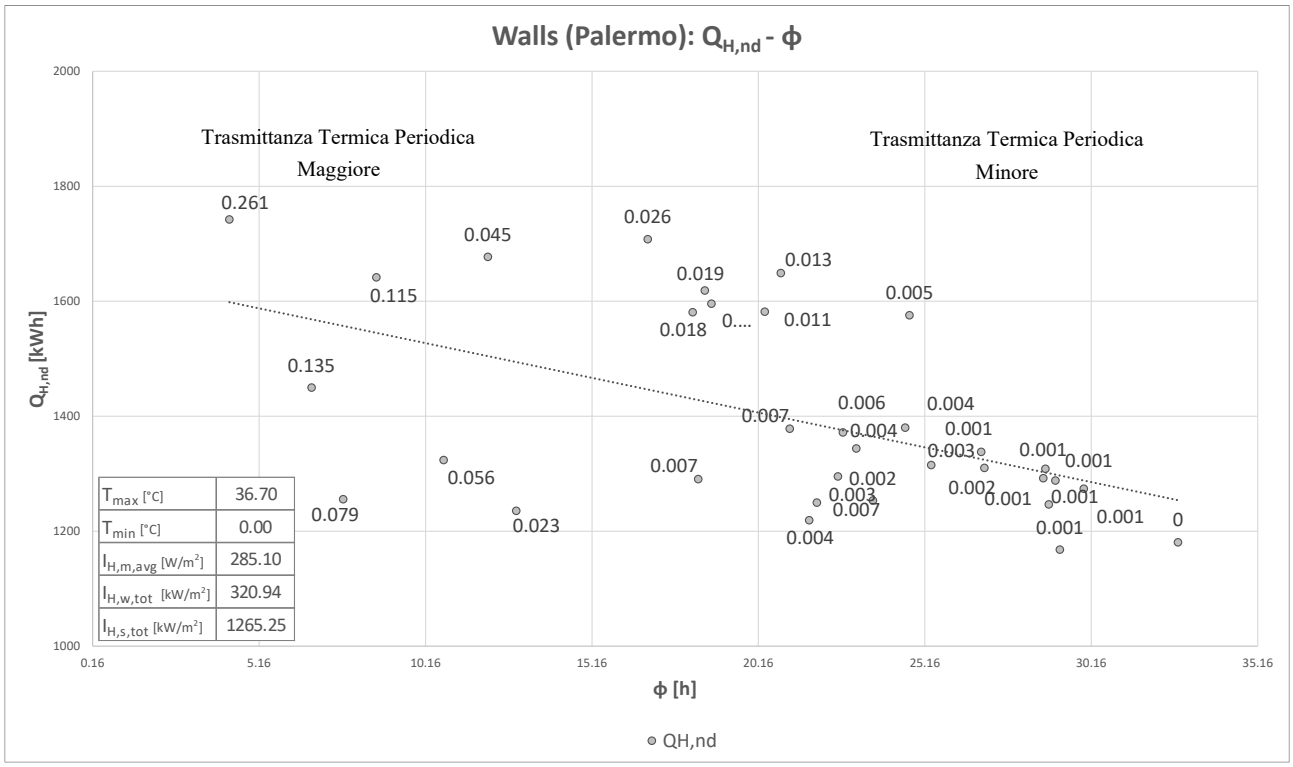

Grafico 17: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Sfasamento, i Numeri Identificano la Trasmittanza Termica Periodica [W/(m²K)]

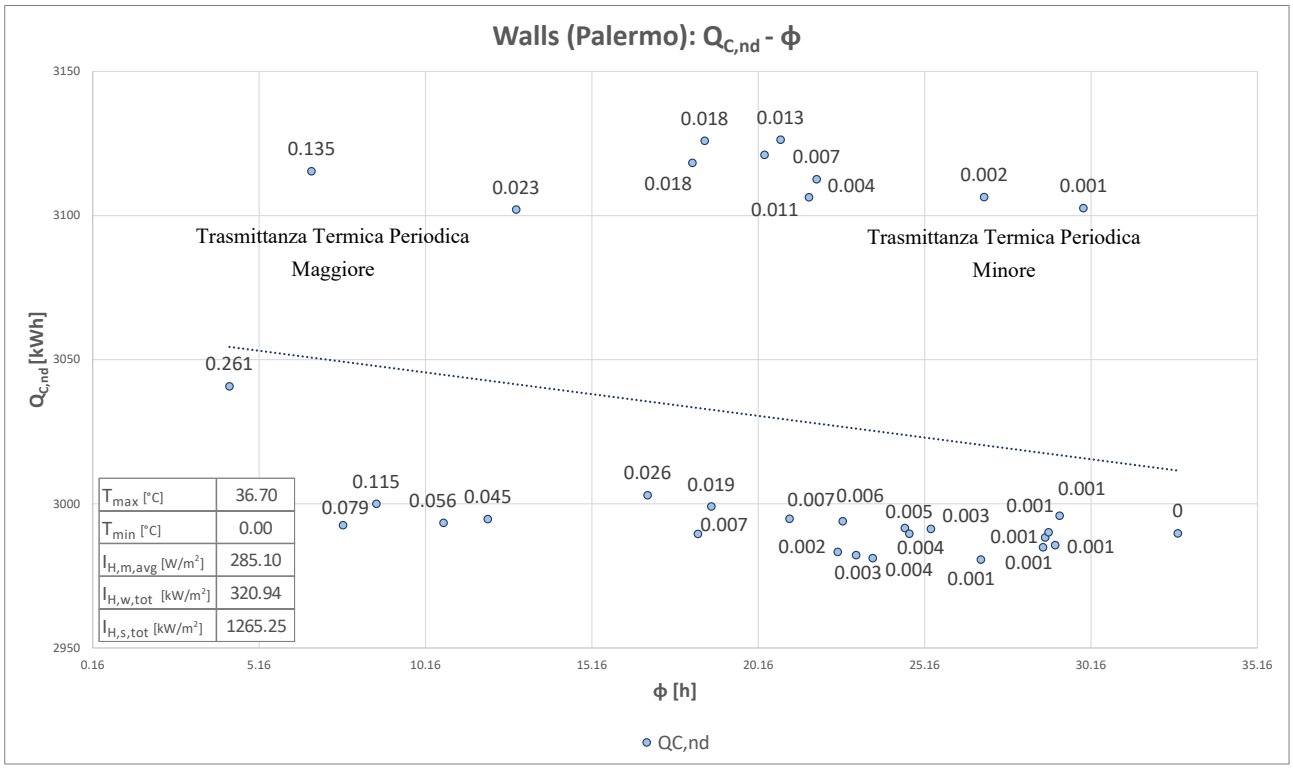

Grafico 18: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Sfasamento, i Numeri Identificano la Trasmittanza Termica Periodica [W/(m²K)]

In conclusione, per la località di Palermo, si può osservare che:

Nel periodo invernale il parametro che più influenza il fabbisogno di energia è la trasmittanza termica, mentre la variazione di capacità termica interna non influenzerà in modo significativo il fabbisogno come nei casi di Roma e Milano.

Nel periodo estivo all'aumentare della trasmittanza termica aumenta anche il fabbisogno, invertendo il comportamento rispetto alle località precedenti. Inoltre, in funzione del valore assunto dalla trasmittanza termica l'effetto della massa superficiale varierà. Non si è evidenziato un comportamento riconoscibile del fabbisogno legato all'aumento o alla diminuzione della trasmittanza termica periodica.

4.2 Valutazione del Fabbisogno di Energia Utile di una Villetta Unifamiliare Con Solaio di Sottotetto Isolato e Copertura Non Isolata

Anche in questo caso sono stati determinati i fabbisogni di energia utili attraverso l'applicazione del metodo dinamico riportato nella norma UNI EN ISO 52016 al variare delle strutture opache esterne e delle località. A differenza del caso precedente l'edificio presenta un solaio isolato di sottotetto e una copertura non isolata. Il solaio di sottotetto divide le zone termiche riscaldate del piano primo dalla zona termica non riscaldata che si viene a creare introducendo quest'ultimo solaio. In questo caso sarà quindi presente un volume riscaldato minore rispetto al caso precedente e un volume non riscaldato. La copertura non isolata rispetta il valore di trasmittanza limite di 0,80 W/m^{2}K imposto nel capitolo 3.3 comma 5 del DM 26 giugno 2015 per tutte le strutture opache, verticali, orizzontali e inclinate, che delimitano verso l'ambiente esterno gli ambienti non dotati di impianto di climatizzazione adiacenti agli ambienti climatizzati. Analizzando i risultati per le diverse località si giunge alle medesime osservazioni riportate per il caso dell'edificio senza sottotetto.

4.2.1 Milano

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Total Internal Heat Capacity	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Attenuation f_a	Time Shift ϕ	Areal Internal Heat Capacity k_J	Heating Energy Need $Q_{H,nd}$	Cooling Energy Need $Q_{C,nd}$
-	-	[W/(m²K)]	[kg/m²]	[kJ/m²K]	[W/(m²K)]	[-]	[h]	[kJ/(m²K)]	[kWh]	[kWh]
Walls										
1	Milan	0.208	253.50	301.70	0.004	0.020	21.68	37.76	3389.60	2103.74
2	Milan	0.228	315.00	350.40	0.004	0.019	23.10	44.12	3525.86	2082.03
3	Milan	0.214	373.50	421.50	0.001	0.006	28.78	37.91	3430.56	2097.75
4	Milan	0.207	230.40	270.50	0.007	0.033	18.35	39.18	3398.24	2103.87
5	Milan	0.197	355.60	395.70	0.002	0.009	23.60	41.90	3291.22	2102.77
6	Milan	0.230	432.00	480.00	0.001	0.005	29.93	39.57	3544.54	2083.34
7	Milan	0.218	227.80	275.80	0.007	0.031	21.92	34.56	3471.17	2101.85
8	Milan	0.231	278.64	327.10	0.056	0.241	10.70	42.74	3464.12	2101.53
9	Milan	0.163	292.99	341.00	0.001	0.006	29.22	34.36	3055.76	2142.12
10	Milan	0.211	385.06	364.30	0.003	0.014	22.55	41.41	3398.28	2095.08
11	Milan	0.208	444.15	408.50	0.001	0.004	29.08	38.86	3377.97	2099.91
12	Milan	0.206	288.24	310.30	0.079	0.383	7.68	49.84	3282.10	2119.40
13	Milan	0.214	239.80	262.40	0.023	0.109	12.88	45.83	3434.14	2095.74
14	Milan	0.209	360.00	402.40	0.001	0.005	28.72	41.93	3386.32	2098.82
15	Milan	0.215	287.00	351.00	0.003	0.015	25.35	39.77	3443.10	2100.12
16	Milan	0.169	369.00	433.00	0.000	0.003	32.77	39.80	3091.70	2132.88
17	Milan	0.192	328.00	392.00	0.001	0.007	28.88	39.87	3263.15	2116.32
18	Milan	0.227	405.30	453.80	0.001	0.005	26.85	41.52	3512.64	2081.42
19	Milan	0.216	52.13	71.50	0.12	0.554	6.67	21.63	3471.62	2115.83
20	Milan	0.216	52.13	71.50	0.12	0.554	6.67	21.63	3593.85	2070.04

Tabella 22: Caratteristiche Strutture Opache e Fabbisogni di Energia Utile (Milano)

Nel periodo invernale strutture con trasmittanza termica ridotta e capacità termica interna elevata garantiscono un fabbisogno energetico invernale minore, mentre nel periodo estivo strutture con trasmittanza termica non eccessivamente ridotta, massa superficiale elevata, trasmittanza termica periodica ridotta e sfasamento elevato permettono di garantire un fabbisogno energetico estivo minore.

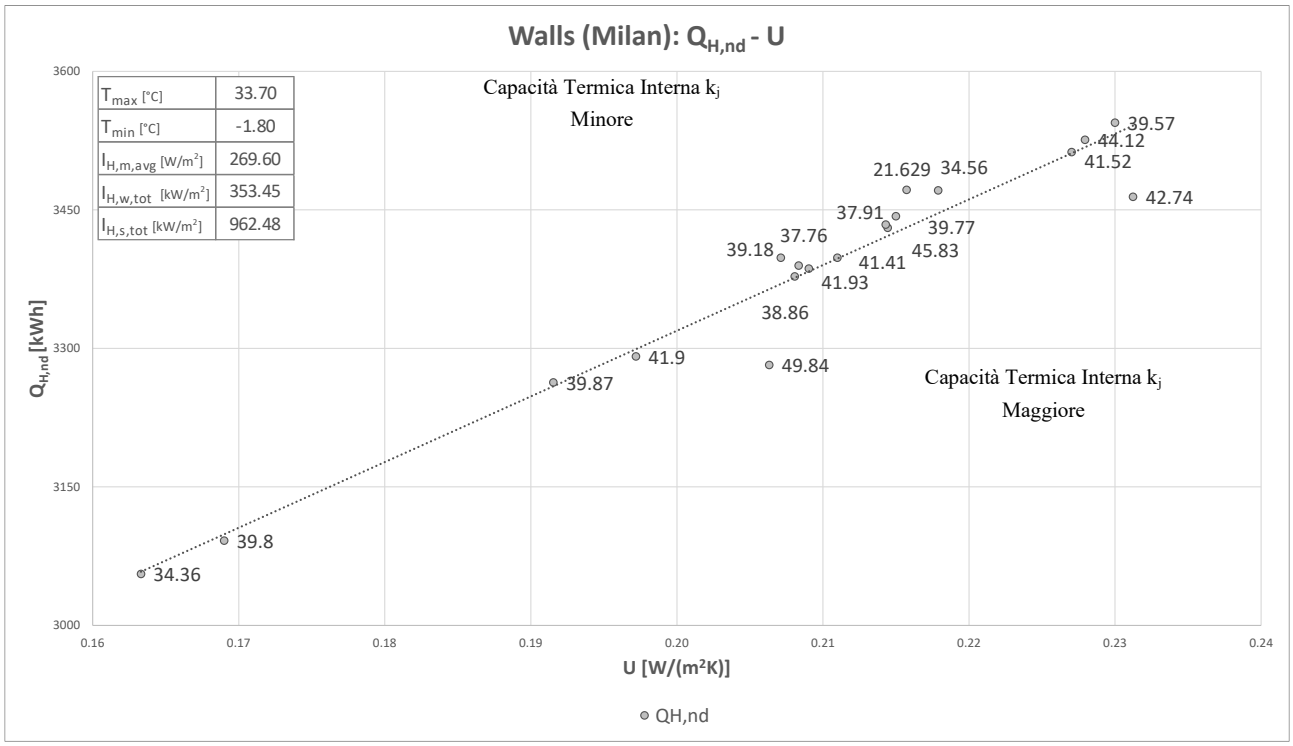

Grafico 19: Rapporto tra Fabbisogno Invernale e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Capacità Termica Interna [kJ/(m²K)]

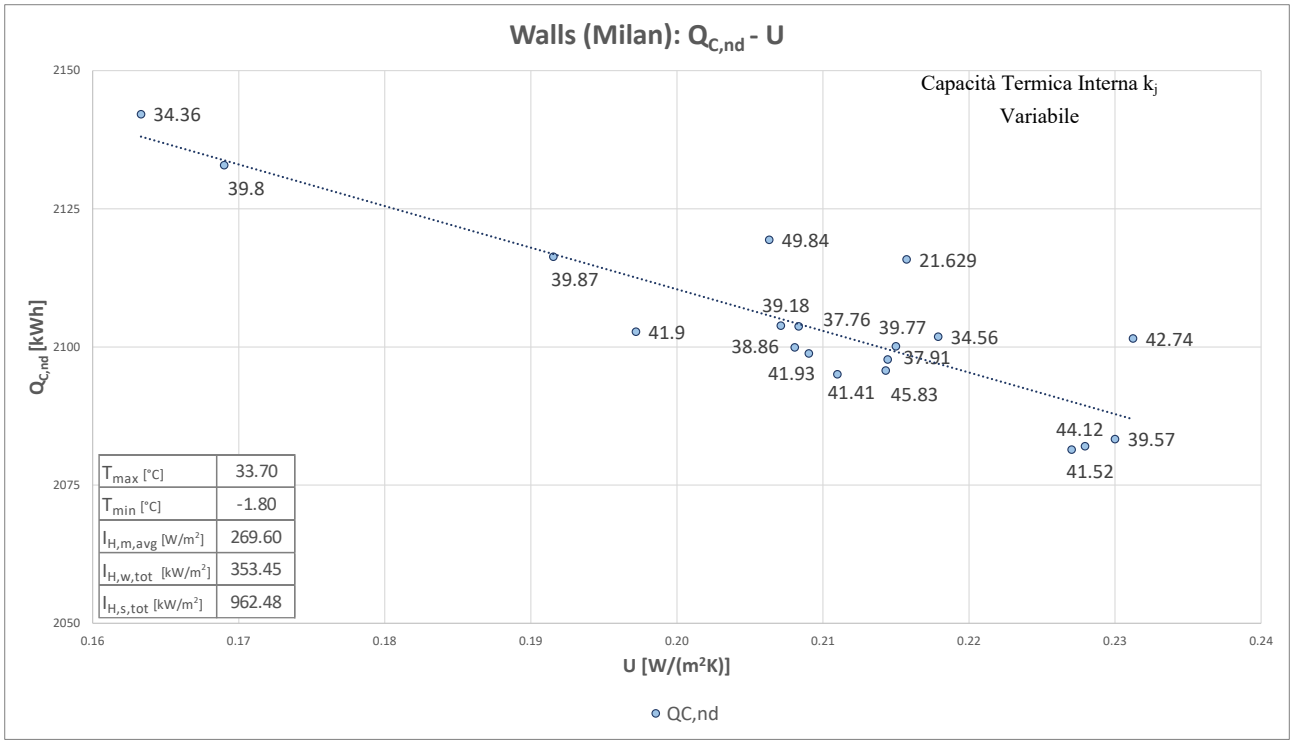

Grafico 20: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Capacità Termica Interna [kJ/(m²K)]

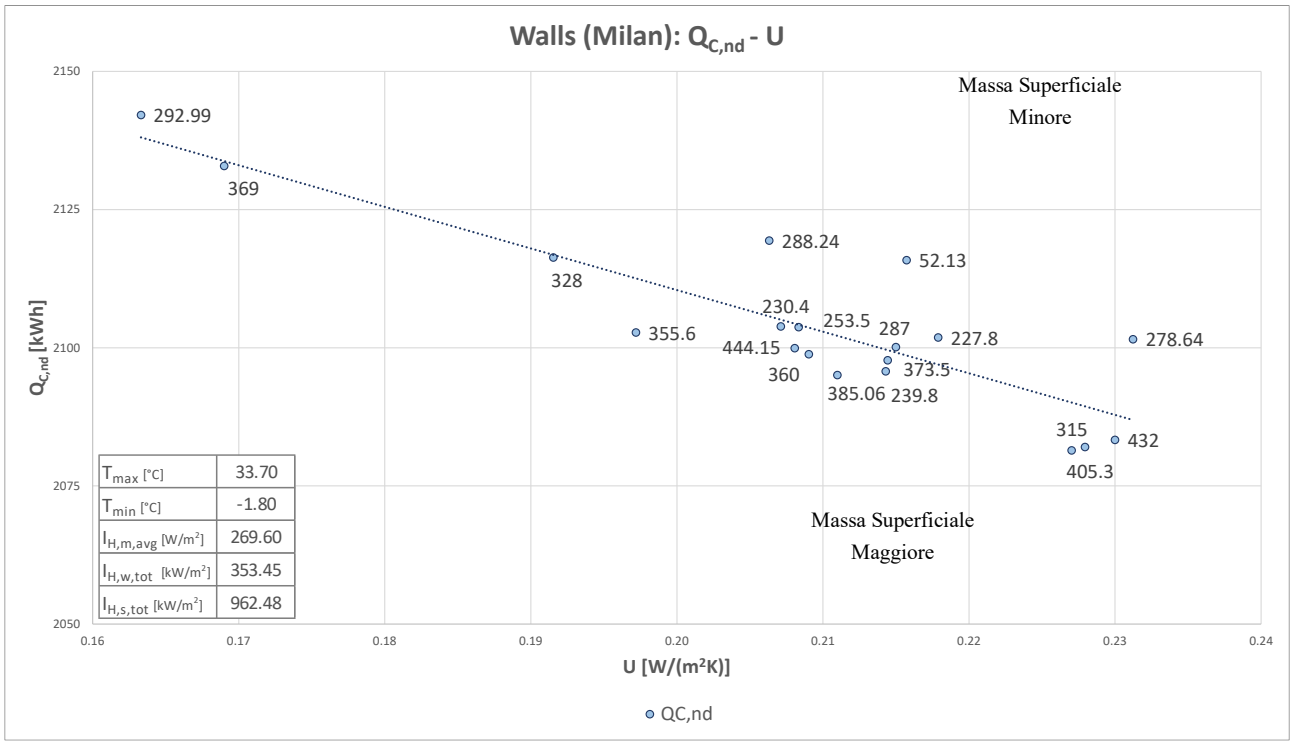

Grafico 21: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Massa Superficiale [kg/m²]

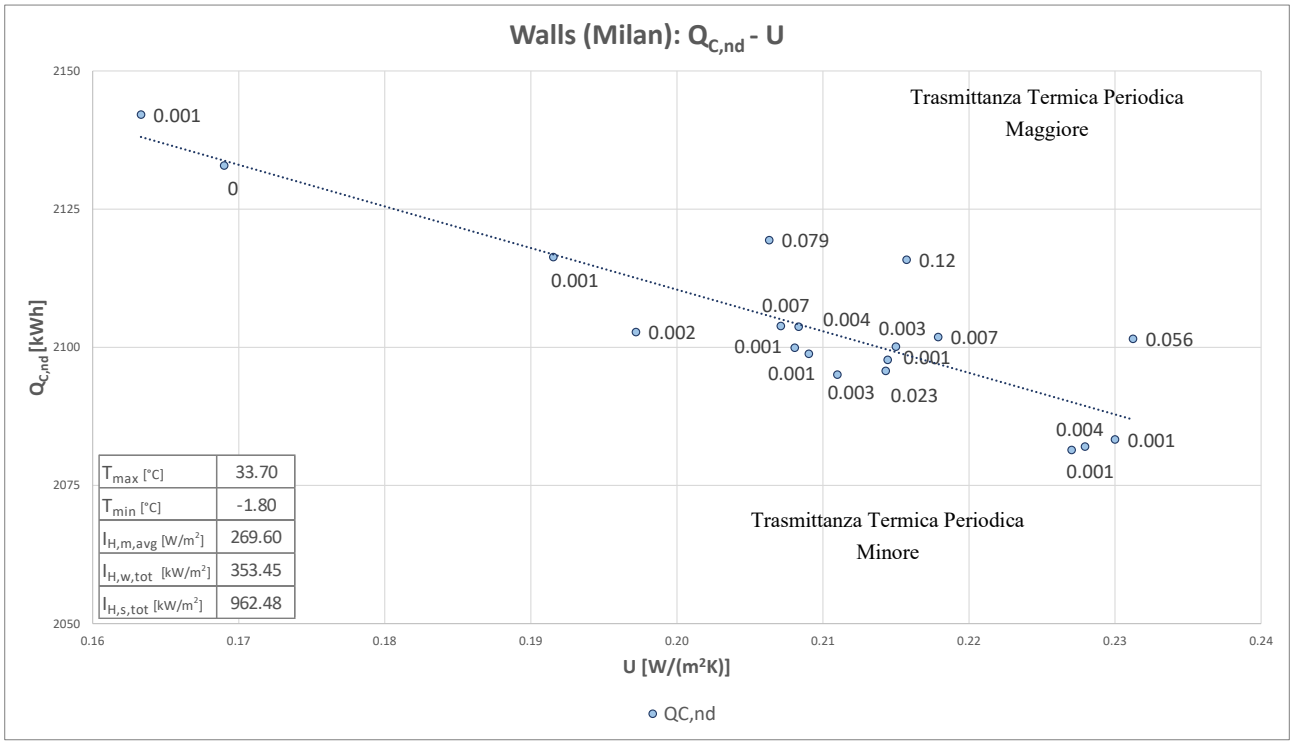

Grafico 22: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Trasmittanza Termica Periodica [W/(m²K)]

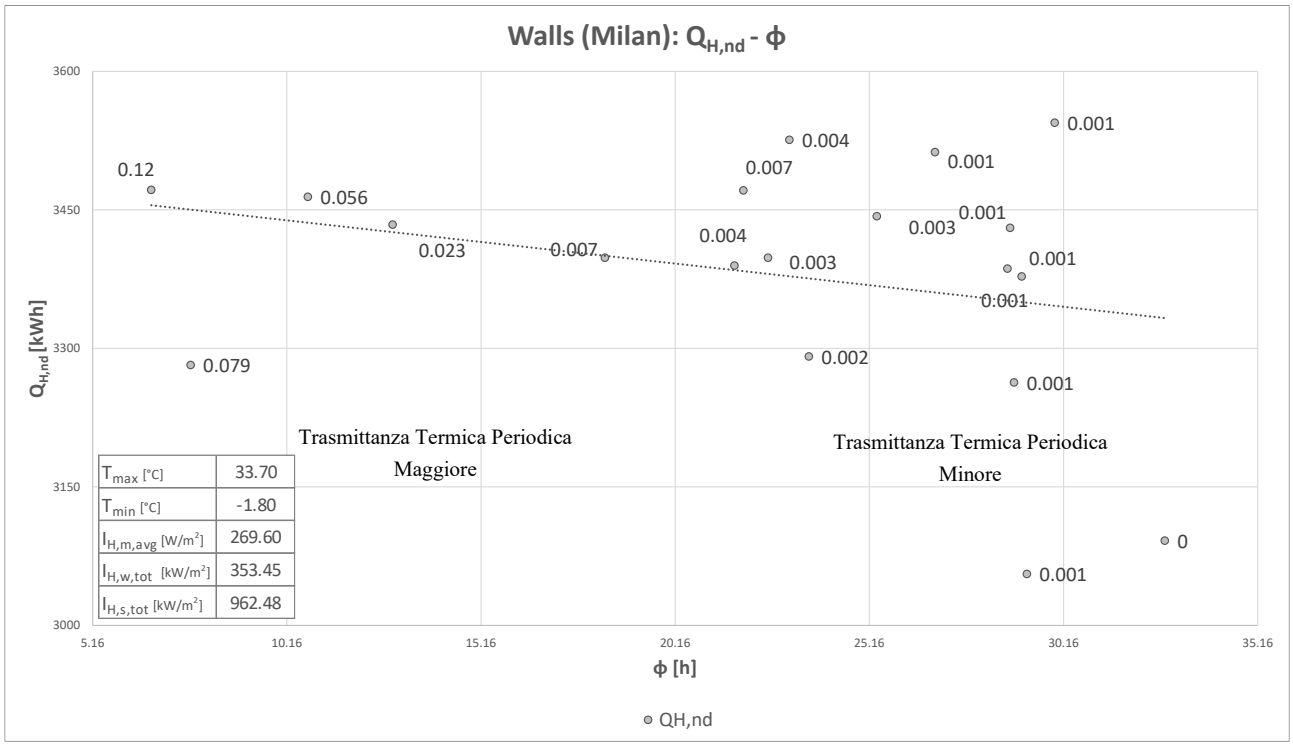

Grafico 23: Rapporto tra Fabbisogno Invernale e Sfasamento, i Numeri Identificano la Trasmittanza Termica Periodica [W/(m²K)]

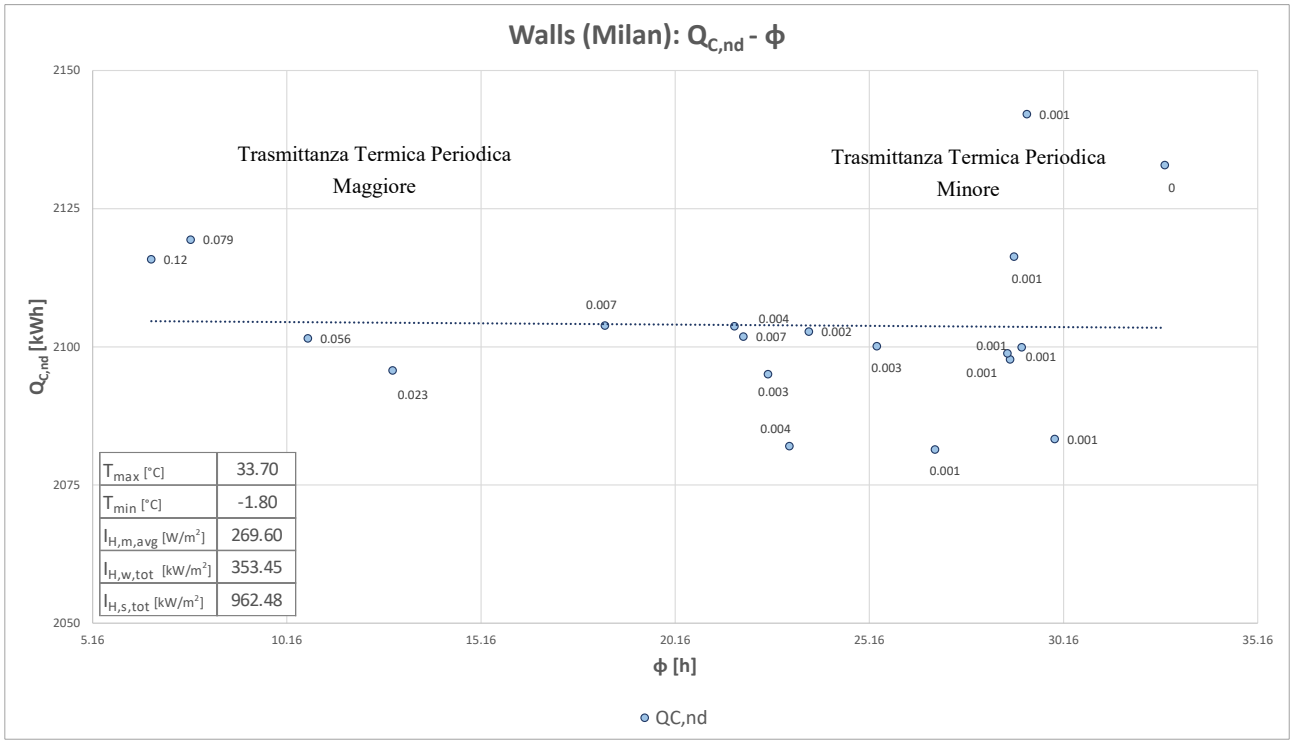

Grafico 24: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Sfasamento, i Numeri Identificano la Trasmittanza Termica Periodica [W/(m²K)]

4.2.2 Roma

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Total Internal Heat Capacity	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Attenuation f_a	Time Shift ϕ	Areal Internal Heat Capacity k_J	Heating Energy Need $Q_{H,nd}$	Cooling Energy Need $Q_{C,nd}$
-	-	[W/(m²K)]	[kg/m²]	[kJ/m²K]	[W/(m²K)]	[-]	[h]	[kJ/(m²K)]	[kWh]	[kWh]
Walls										
1	Rome	0.208	253.50	301.70	0.004	0.020	21.68	37.76	780.10	6312.66
2	Rome	0.228	315.00	350.40	0.004	0.019	23.10	44.12	839.55	6256.68
3	Rome	0.214	373.50	421.50	0.001	0.006	28.78	37.91	799.56	6297.20
4	Rome	0.207	230.40	270.50	0.007	0.033	18.35	39.18	774.15	6312.87
5	Rome	0.197	355.60	395.70	0.002	0.009	23.60	41.90	724.34	6320.10
6	Rome	0.230	432.00	480.00	0.001	0.005	29.93	39.57	875.12	6211.19
7	Rome	0.239	228.86	257.10	0.007	0.031	21.10	35.77	916.49	6213.11
8	Rome	0.218	227.80	275.80	0.007	0.031	21.92	34.56	825.62	6302.82
9	Rome	0.231	278.64	327.10	0.056	0.241	10.70	42.74	816.48	6296.03
10	Rome	0.163	292.99	341.00	0.001	0.006	29.22	34.36	639.89	6373.03
11	Rome	0.238	265.09	313.10	0.006	0.026	22.70	36.17	917.33	6210.51
12	Rome	0.211	385.06	364.30	0.003	0.014	22.55	41.41	798.30	6248.09
13	Rome	0.243	444.15	421.10	0.002	0.010	26.95	38.85	926.75	6190.50
14	Rome	0.208	444.15	408.50	0.001	0.004	29.08	38.86	791.35	6259.30
15	Rome	0.206	288.24	310.30	0.079	0.383	7.68	49.84	744.42	6297.41
16	Rome	0.214	239.80	262.40	0.023	0.109	12.88	45.83	815.00	6241.19
17	Rome	0.209	360.00	402.40	0.001	0.005	28.72	41.93	794.63	6254.83
18	Rome	0.215	287.00	351.00	0.003	0.015	25.35	39.77	827.94	6252.60
19	Rome	0.169	369.00	433.00	0.000	0.003	32.77	39.80	652.70	6349.16
20	Rome	0.192	328.00	392.00	0.001	0.007	28.88	39.87	737.17	6300.86
21	Rome	0.227	405.30	453.80	0.001	0.005	26.85	41.52	855.25	6210.83
22	Rome	0.239	308.25	356.30	0.004	0.017	24.57	37.29	917.21	6204.48
23	Rome	0.245	49.63	68.90	0.154	0.631	5.87	22.12	916.49	6213.11
24	Rome	0.245	49.63	68.90	0.154	0.631	5.87	22.12	947.92	6279.78

Tabella 23: Caratteristiche Strutture Opache e Fabbisogni di Energia Utile (Roma)

Nel periodo invernale strutture con trasmittanza termica ridotta e capacità termica interna elevata garantiscono un fabbisogno energetico invernale minore, mentre nel periodo estivo strutture con trasmittanza termica non eccessivamente ridotta, massa superficiale elevata, trasmittanza termica periodica ridotta e sfasamento non elevato permettono di garantire un fabbisogno energetico estivo minore.

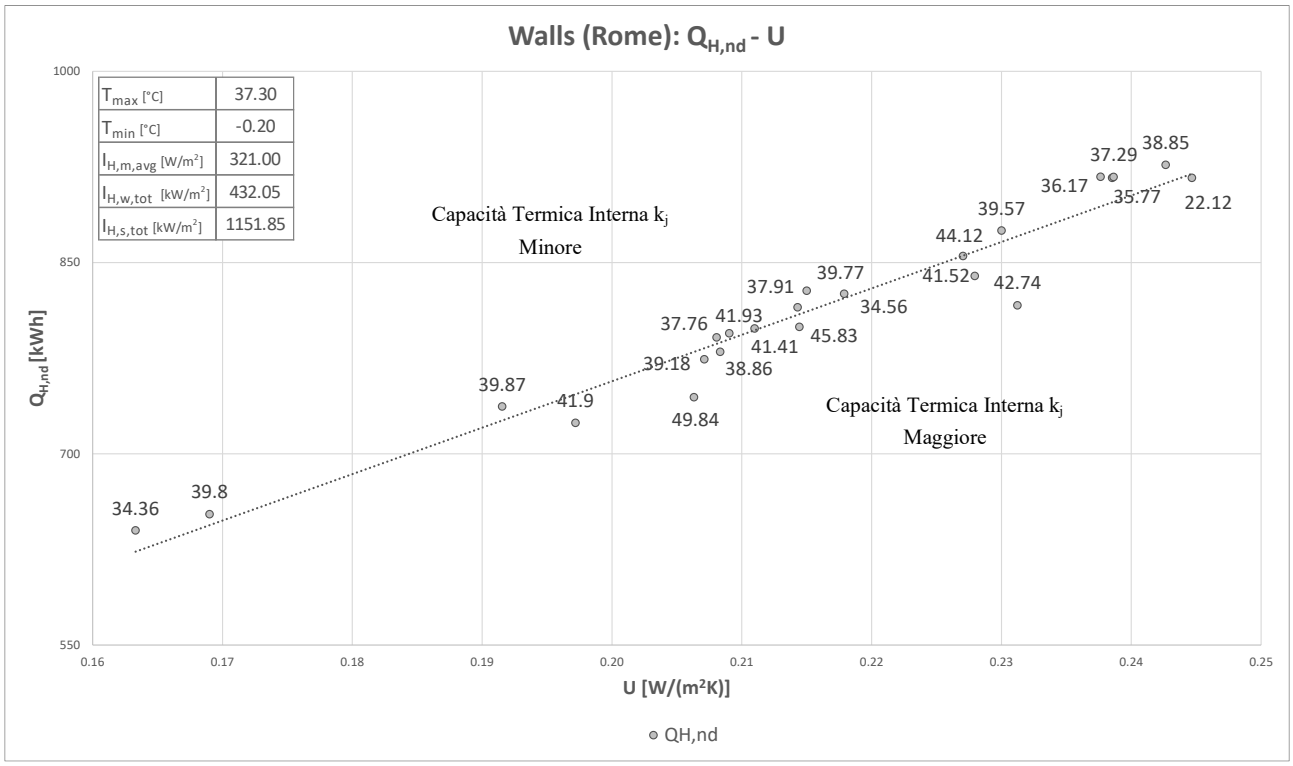

Grafico 25: Rapporto tra Fabbisogno Invernale e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Capacità Termica Interna [kJ/(m²K)]

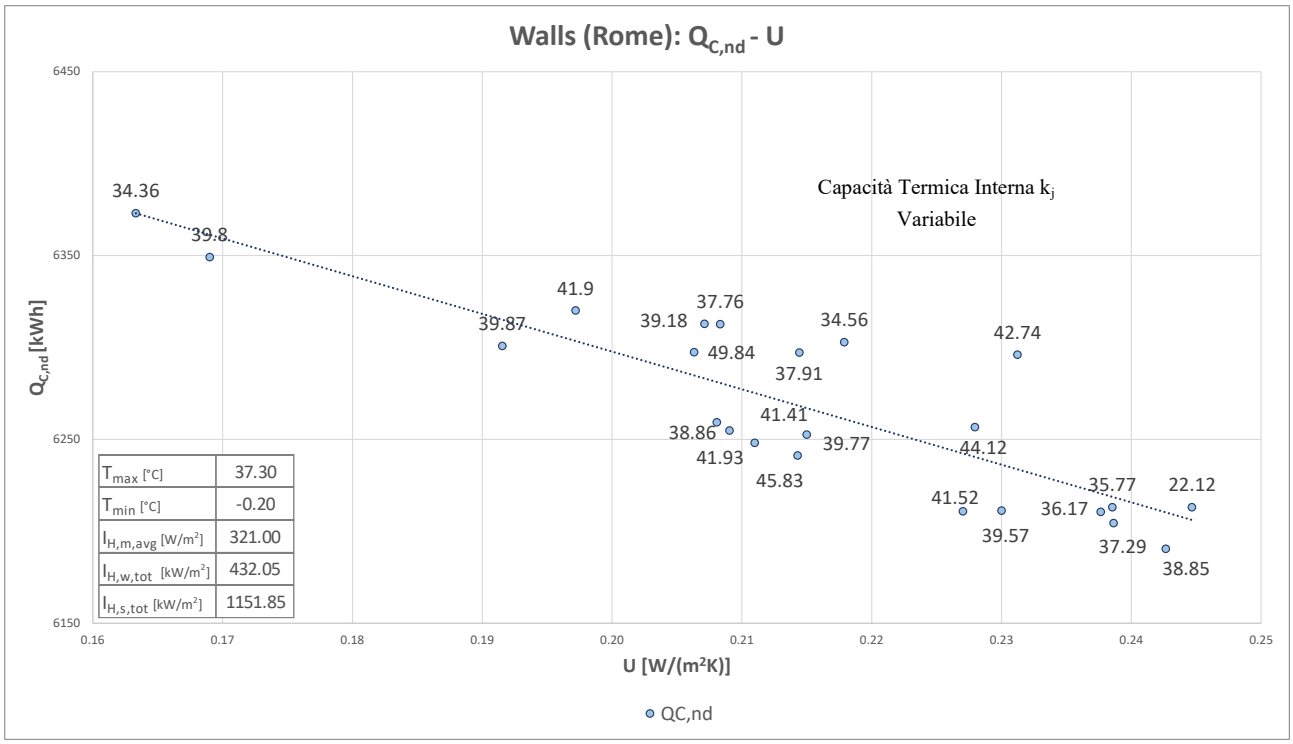

Grafico 26: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Capacità Termica Interna [kJ/(m²K)]

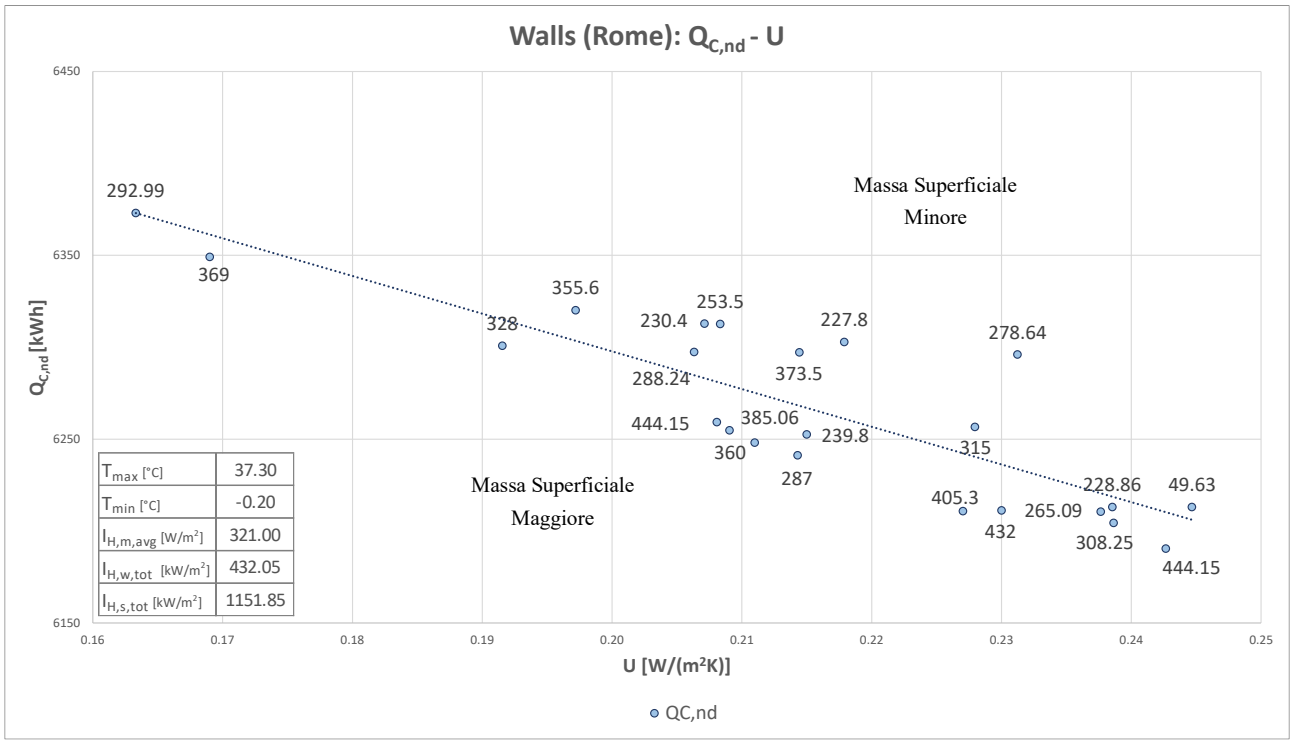

Grafico 27: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Massa Superficiale [kg/m²]

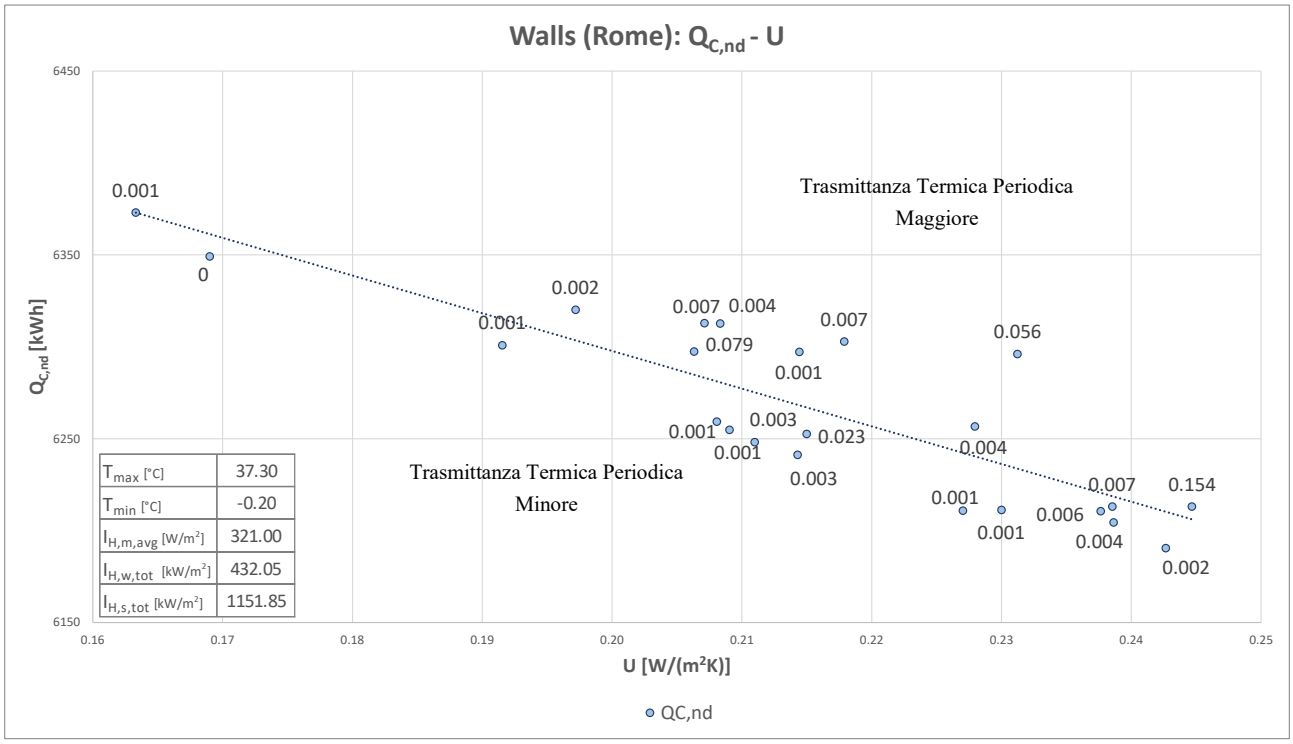

Grafico 28: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Trasmittanza Termica Periodica [W/(m²K)]

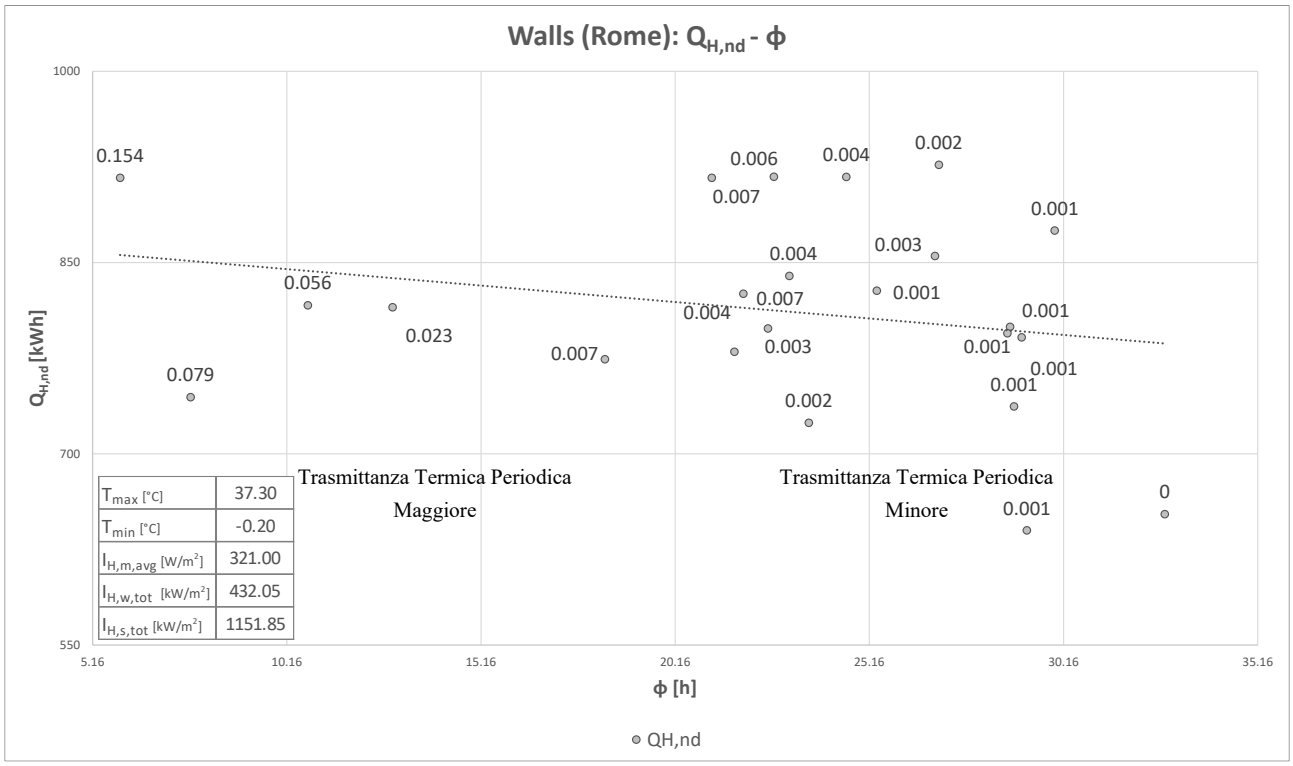

Grafico 29: Rapporto tra Fabbisogno Invernale e Sfasamento, i Numeri Identificano la Trasmittanza Termica Periodica [W/(m²K)]

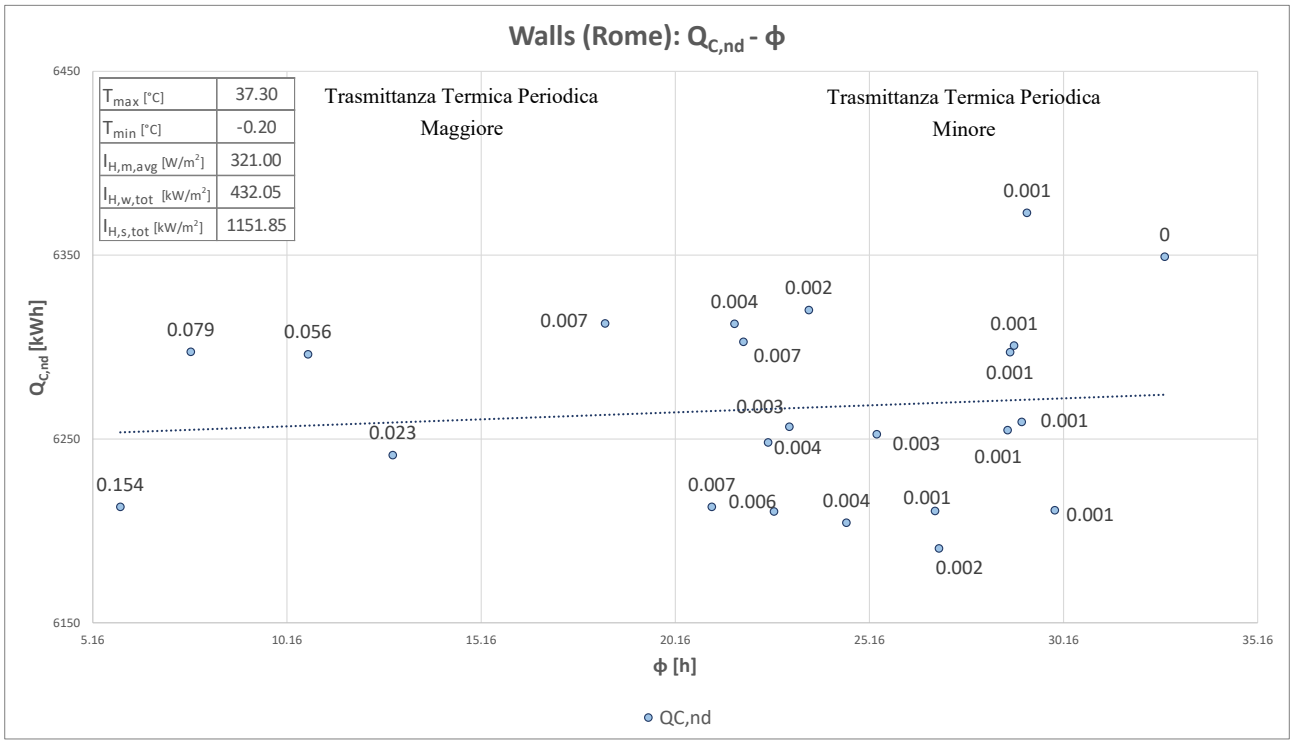

Grafico 30: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Sfasamento, i Numeri Identificano la Trasmittanza Termica Periodica [W/(m²K)]

4.2.3 Palermo

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Total Internal Heat Capacity	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Attenuation f_a	Time Shift ϕ	Areal Internal Heat Capacity k_J	Heating Energy Need $Q_{H,nd}$	Cooling Energy Need $Q_{C,nd}$
-	-	[W/(m²K)]	[kg/m²]	[kJ/m²K]	[W/(m²K)]	[-]	[h]	[kJ/(m²K)]	[kWh]	[kWh]
Walls										
1	Palermo	0.208	253.50	301.70	0.004	0.020	21.68	37.76	1093.28	3101.38
2	Palermo	0.228	315.00	350.40	0.004	0.019	23.10	44.12	1136.95	3093.68
3	Palermo	0.214	373.50	421.50	0.001	0.006	28.78	37.91	1176.62	2987.38
4	Palermo	0.315	246.00	294.00	0.019	0.060	18.75	37.60	1440.21	2990.46
5	Palermo	0.343	294.00	342.00	0.018	0.052	18.18	44.02	1425.28	3103.88
6	Palermo	0.207	230.40	270.50	0.007	0.033	18.35	39.18	1090.17	3100.34
7	Palermo	0.197	355.60	395.70	0.002	0.009	23.60	41.90	1125.59	2981.68
8	Palermo	0.230	432.00	480.00	0.001	0.005	29.93	39.57	1215.63	2983.24
9	Palermo	0.355	228.00	256.20	0.026	0.074	16.83	39.10	1543.61	2991.00
10	Palermo	0.368	353.20	392.20	0.013	0.036	20.83	41.74	1572.42	2987.72
11	Palermo	0.356	274.85	303.00	0.018	0.050	18.55	40.55	1460.31	3110.28
12	Palermo	0.239	228.86	257.10	0.007	0.031	21.10	35.77	1240.33	2991.76
13	Palermo	0.218	227.80	275.80	0.007	0.031	21.92	34.56	1191.76	2994.31
14	Palermo	0.231	278.64	327.10	0.056	0.241	10.70	42.74	1119.46	3103.02
15	Palermo	0.163	292.99	341.00	0.001	0.006	29.22	34.36	1047.35	2997.88
16	Palermo	0.238	265.09	313.10	0.006	0.026	22.70	36.17	1241.17	2990.98
17	Palermo	0.370	271.14	319.30	0.115	0.310	8.68	43.64	1401.36	3108.82
18	Palermo	0.211	385.06	364.30	0.003	0.014	22.55	41.41	1164.04	2982.77
19	Palermo	0.243	444.15	421.10	0.002	0.010	26.95	38.85	1249.77	2985.26
20	Palermo	0.208	444.15	408.50	0.001	0.004	29.08	38.86	1157.65	2985.39
21	Palermo	0.343	375.06	343.30	0.011	0.033	20.35	41.30	1508.36	2985.99
22	Palermo	0.206	288.24	310.30	0.079	0.383	7.68	49.84	1126.73	2991.24
23	Palermo	0.214	239.80	262.40	0.023	0.109	12.88	45.83	1177.54	2983.82
24	Palermo	0.324	286.44	307.70	0.135	0.418	6.73	50.13	1381.47	2985.60
25	Palermo	0.345	238.00	259.80	0.045	0.131	12.03	46.14	1514.62	2983.02
26	Palermo	0.209	360.00	402.40	0.001	0.005	28.72	41.93	1161.23	2984.38
27	Palermo	0.215	287.00	351.00	0.003	0.015	25.35	39.77	1182.28	2989.78
28	Palermo	0.169	369.00	433.00	0.000	0.003	32.77	39.80	993.03	3100.60
29	Palermo	0.192	328.00	392.00	0.001	0.007	28.88	39.87	1051.60	3100.98
30	Palermo	0.227	405.30	453.80	0.001	0.005	26.85	41.52	1203.34	2979.43
31	Palermo	0.239	308.25	356.30	0.004	0.017	24.57	37.29	1242.03	2988.70
32	Palermo	0.310	404.10	452.10	0.005	0.016	24.70	41.48	1342.49	3101.06
33	Palermo	0.333	44.63	63.80	0.261	0.785	4.27	22.74	1494.65	3148.00
34	Palermo	0.333	44.63	63.80	0.261	0.785	4.27	22.74	1533.77	3073.62

Tabella 24: Caratteristiche Strutture Opache e Fabbisogni di Energia Utile Palermo)

Nel periodo invernale strutture con trasmittanza termica ridotta garantiscono un fabbisogno energetico invernale minore, mentre la variazione di capacità termica interna non influenzerà in modo significativo il fabbisogno come nei casi di Roma e Milano. Nel periodo estivo all'aumentare della trasmittanza termica e a al diminuire dello sfasamento aumenterà anche il fabbisogno di energia, inoltre, in funzione del valore assunto dalla trasmittanza termica l'effetto della massa superficiale varierà. Non si è evidenziato un comportamento riconoscibile del fabbisogno legato all'aumento o alla diminuzione della trasmittanza termica periodica.

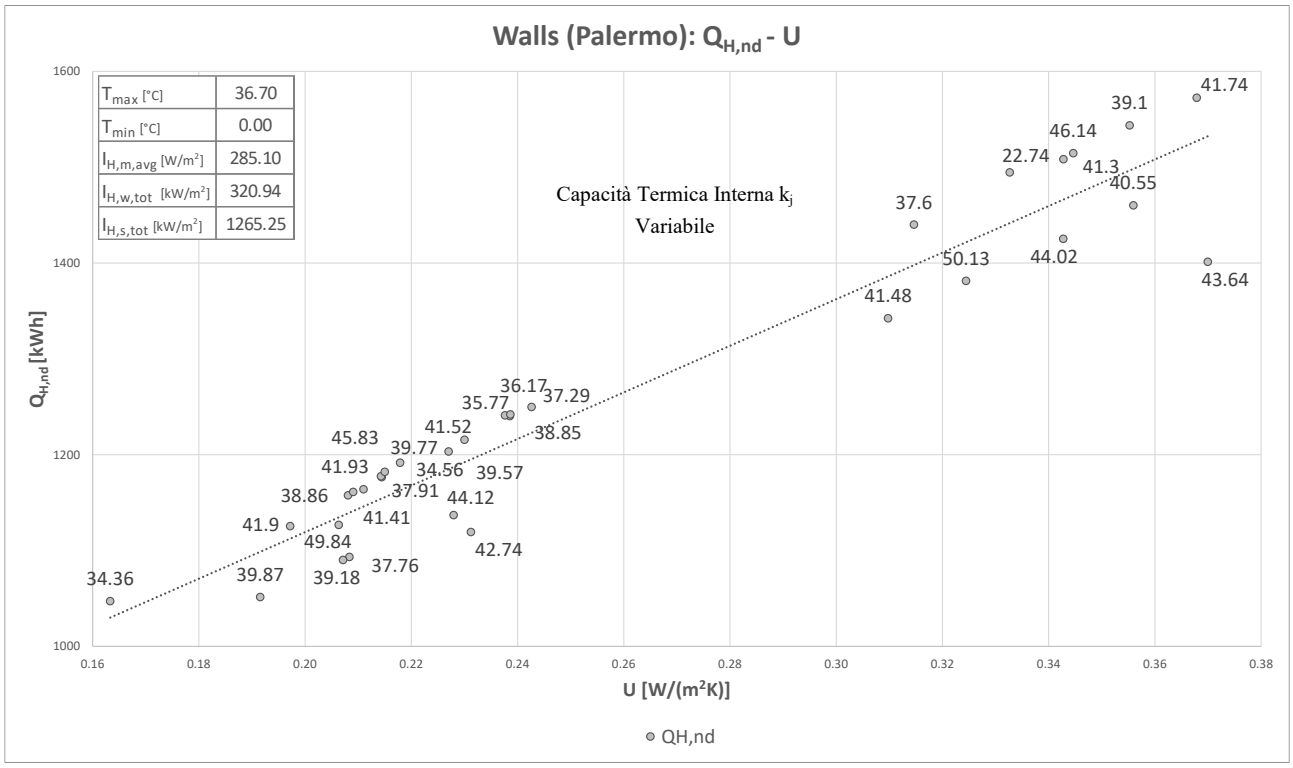

Grafico 31: Rapporto tra Fabbisogno Invernale e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Capacità Termica Interna [kJ/(m²K)]

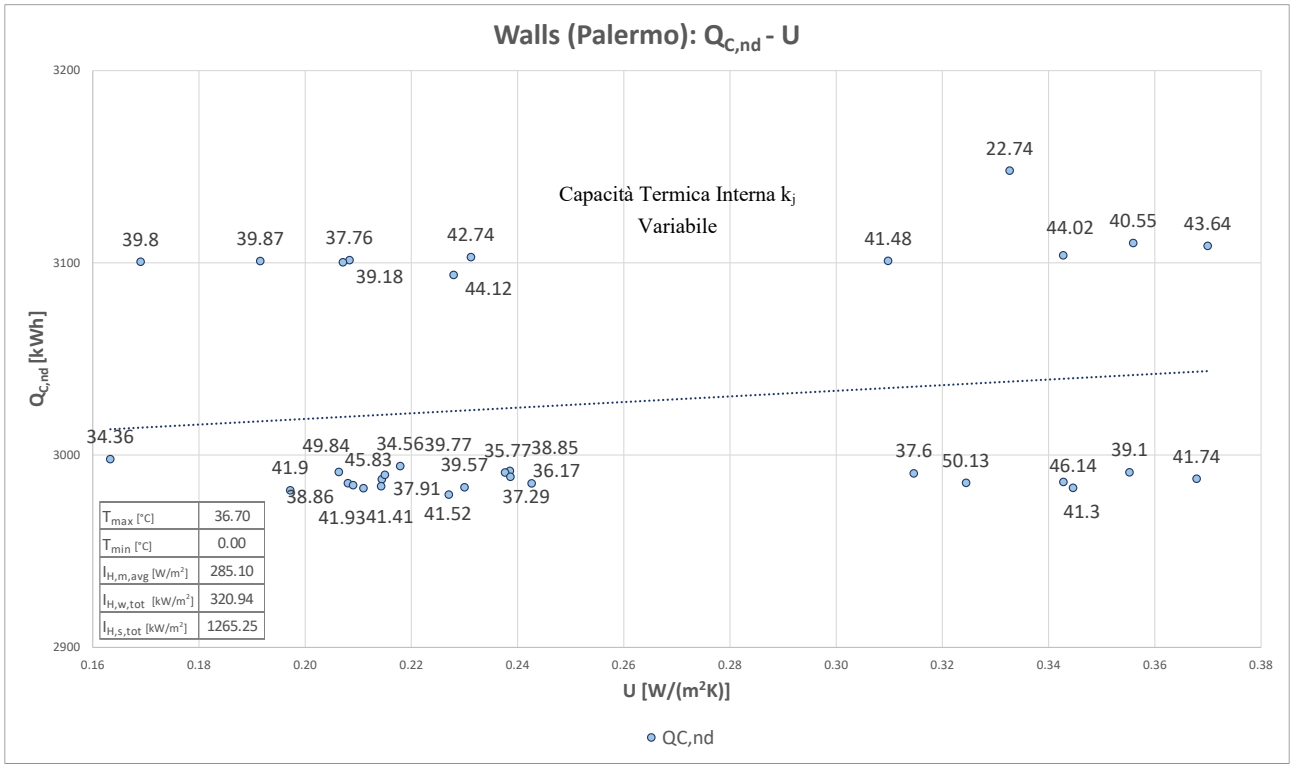

Grafico 32: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Capacità Termica Interna [kJ/(m²K)]

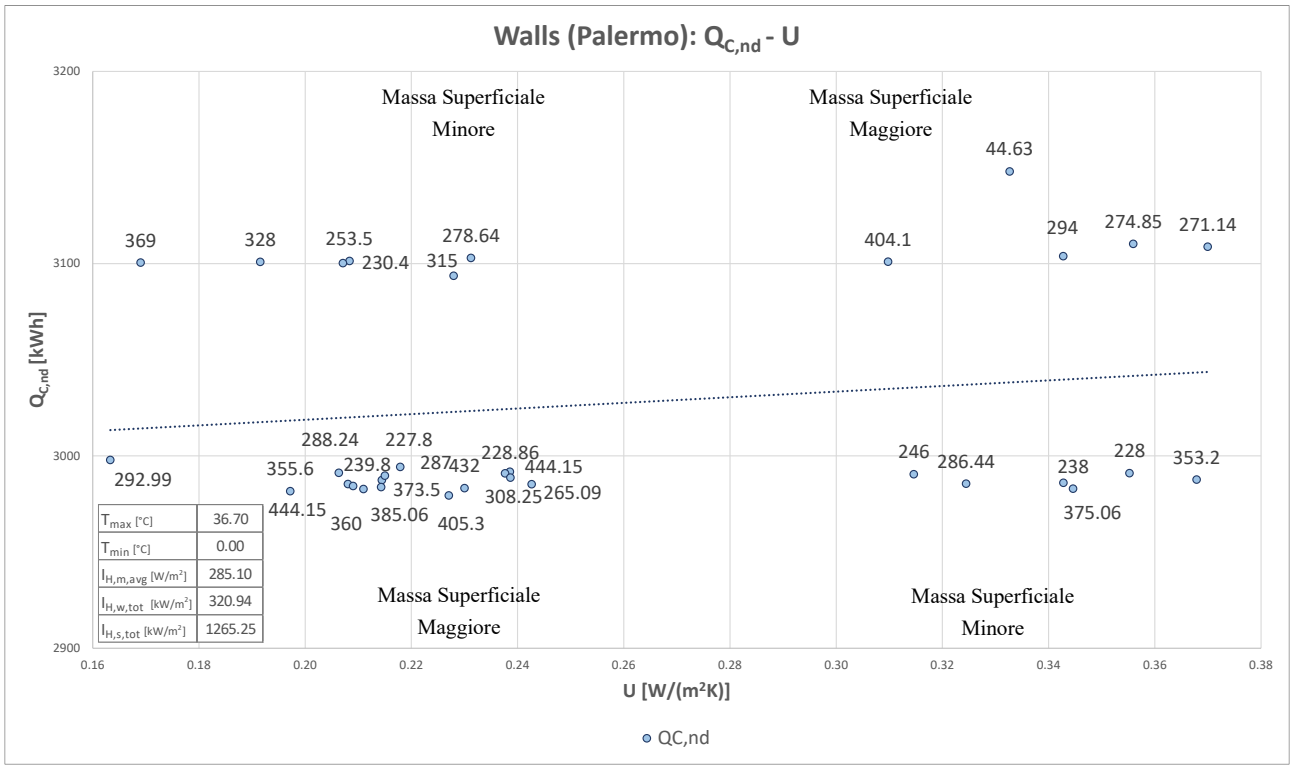

Grafico 33: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Massa Superficiale [kg/m²]

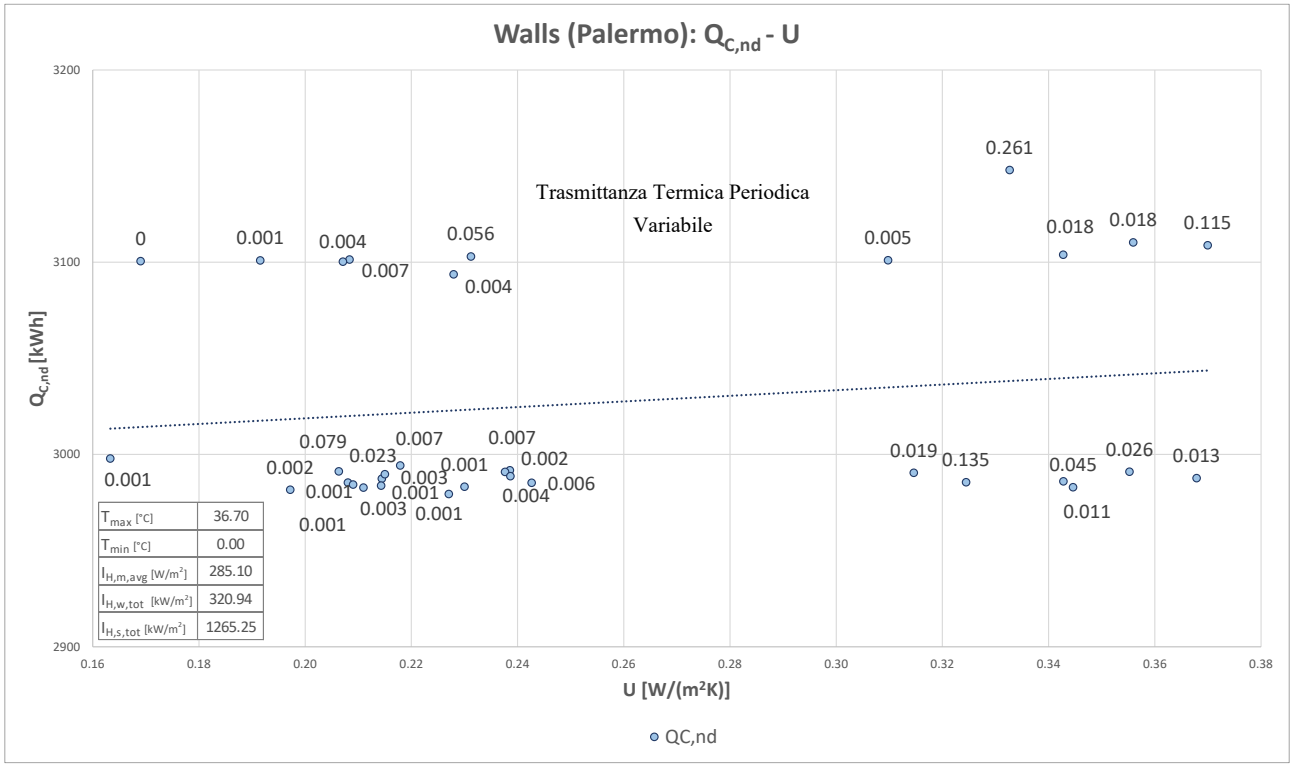

Grafico 34: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Trasmittanza Termica Periodica [W/(m²K)]

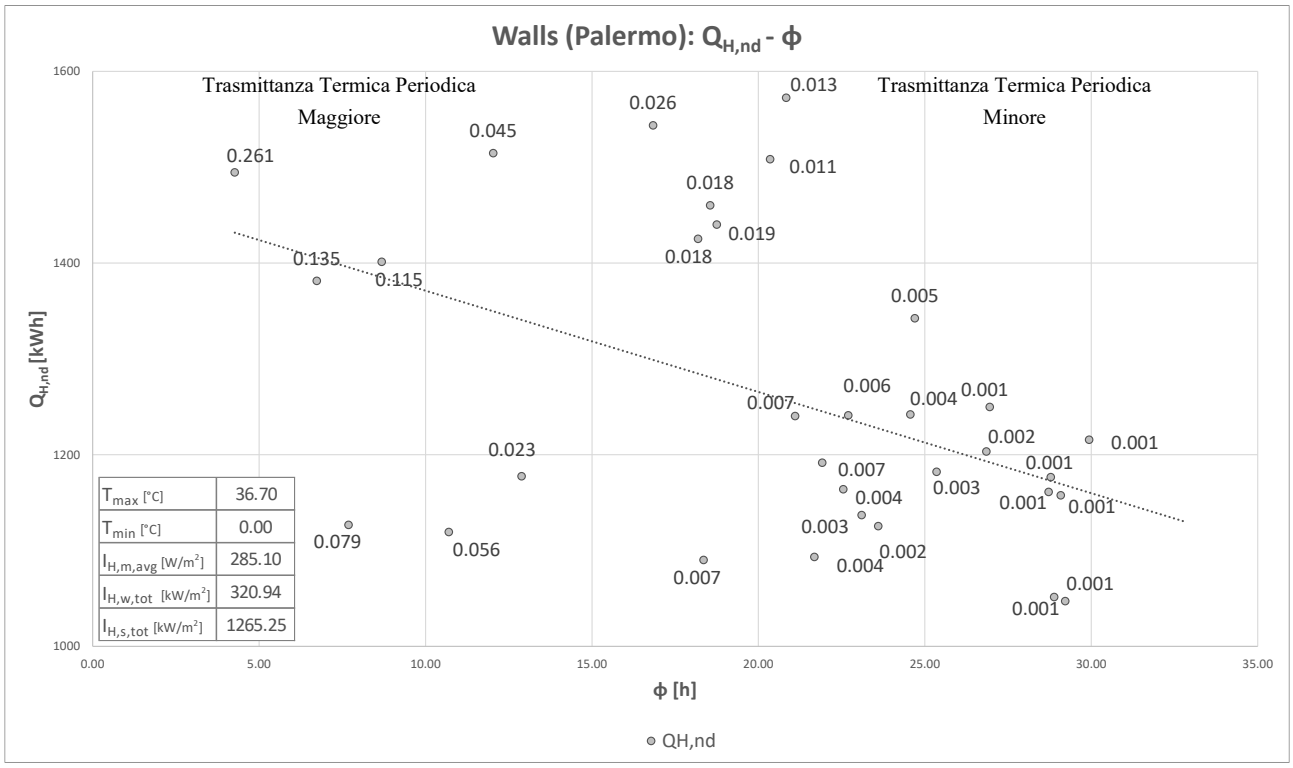

Grafico 35: Rapporto tra Fabbisogno Invernale e Sfasamento, i Numeri Identificano la Trasmittanza Termica Periodica [W/(m²K)]

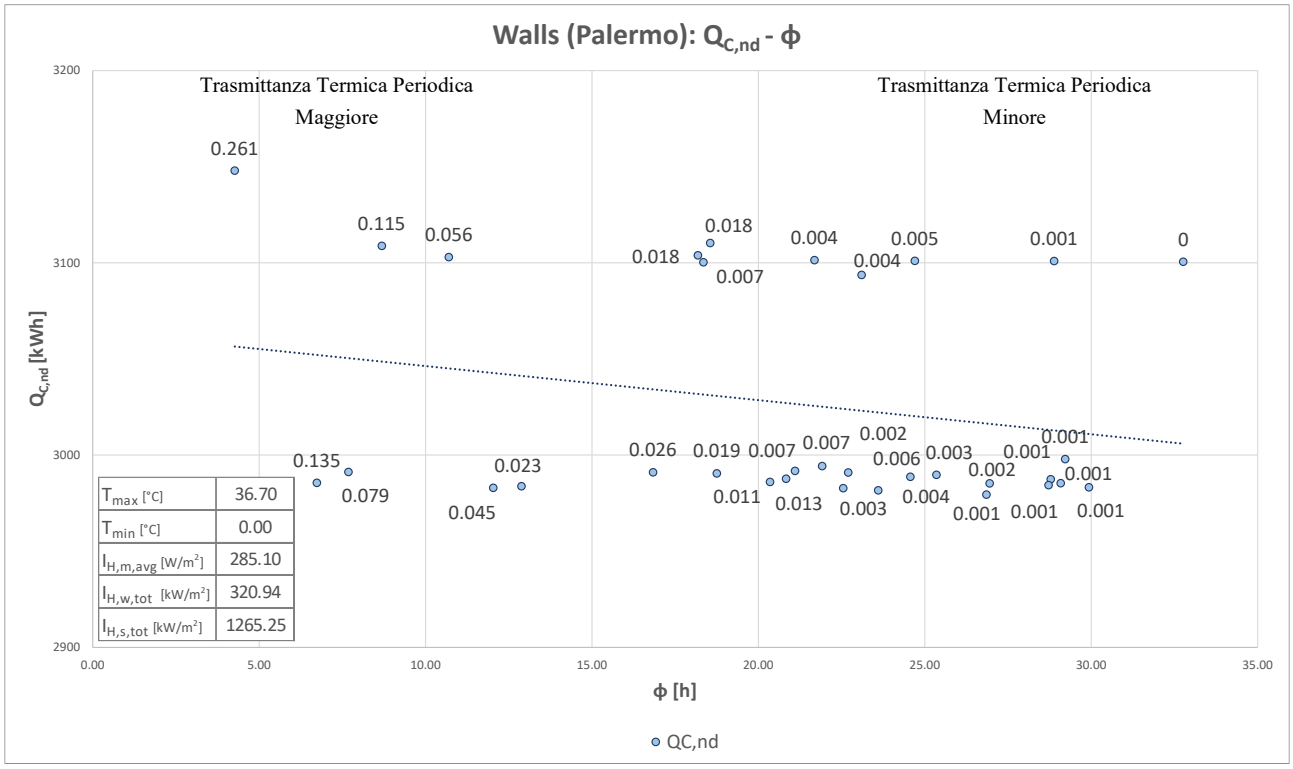

Grafico 36: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Sfasamento, i Numeri Identificano la Trasmittanza Termica Periodica [W/(m²K)]

4.3 Confronto Villetta Unifamiliare Senza Sottotetto Con Villetta Unifamiliare Con Solaio di Sottotetto Isolato e Copertura Non Isolata

Si prosegue l'analisi andando a confrontare per ogni località l'andamento dei fabbisogni invernali ed estivi al variare della tipologia di edificio. Di seguito l'edificio privo di sottotetto verrà definito "Caso Studio 1" mentre l'edificio dotato di un solaio di sottotetto "Caso Studio 2". Le due tipologie di edificio si differenziano in base alla diversa superficie disperdente interna e alla quantità di volume interno riscaldato:

	Case Study 1	Case Study 2	Percentage Increase %
Exchange Surface [m^2]	248.303	235.745	-5.06%
Heated Volume [m^3]	357.518	316.319	-11.52%
Unheated Volume [m^3]	72.664	117.060	61.10%

Tabella 25: Dati sulla Superficie Disperdente Interna, Volume Interno Riscaldato e non Riscaldato per i Due Casi Studio, con Incremento/Decremento Percentuale delle Grandezze del Caso Studio 2 Rispetto al Caso Studio 1

Per superficie disperdente interna si intende l'area delle pareti interne che delimitano il volume riscaldato verso l'esterno o verso zone termiche non riscaldate, mentre per volume interno si intende il volume netto della zona termica considerata. Al fine di differenziare le due tipologie di edificio è possibile anche considerare il rapporto S/V, definito dal Dlgs. 311/06 come rapporto tra la superficie disperdente che delimita il volume riscaldato verso l'esterno e il volume lordo riscaldato. Poiché le analisi coinvolgono pareti di diverso spessore, per il calcolo della superficie disperdente e del volume lordo è stato considerato come spessore delle pareti esterne uno spessore medio pari a 42 cm.

	Case Study 1	Case Study 2	Percentage Increase %
Exchange Surface [m^2]	426.210	409.205	-3.99%
Heated Volume [m^3]	557.311	511.965	-8.14%
S/V [1/m]	0.765	0.799	4.51%

Tabella 26 Dati sulla Superficie Disperdente e sul Volume Lordo Riscaldato per i Due Casi Studio, con Incremento/Decremento Percentuale delle Grandezze del Caso Studio 2 Rispetto al Caso Studio 1

4.3.1 Milano

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Heating Energy Need $Q_{H,nd}$ Case Study 1	Cooling Energy Need $Q_{C,nd}$ Case Study 1	Heating Energy Need $Q_{H,nd}$ Case Study 2	Cooling Energy Need $Q_{C,nd}$ Case Study 2	Total Energy Need $Q_{tot,nd}$ Case Study 1	Total Energy Need $Q_{tot,nd}$ Case Study 2	$Q_{tot,nd}$ Percentage Increase %
-	-	[W/(m²K)]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[-]
1	Milan	0.208	3822.34	2056.77	3389.60	2103.74	5879.11	5493.34	7.02%
2	Milan	0.228	3969.80	2036.43	3525.86	2082.03	6006.24	5607.89	7.10%
3	Milan	0.214	3866.30	2050.62	3430.56	2097.75	5916.92	5528.31	7.03%
4	Milan	0.207	3812.71	2056.99	3398.24	2103.87	5869.70	5502.11	6.68%
5	Milan	0.197	3714.39	2053.42	3291.22	2102.77	5767.82	5393.99	6.93%
6	Milan	0.230	3989.51	2037.24	3544.54	2083.34	6026.76	5627.88	7.09%
7	Milan	0.218	3910.50	2056.61	3471.17	2101.85	5967.11	5573.02	7.07%
8	Milan	0.231	3903.49	2057.32	3464.12	2101.53	5960.80	5565.65	7.10%
9	Milan	0.163	3459.73	2090.30	3055.76	2142.12	5550.03	5197.88	6.77%
10	Milan	0.211	3831.27	2047.52	3398.28	2095.08	5878.79	5493.35	7.02%
11	Milan	0.208	3809.04	2051.68	3377.97	2099.91	5860.72	5477.89	6.99%
12	Milan	0.206	3706.94	2073.09	3282.10	2119.40	5780.03	5401.50	7.01%
13	Milan	0.214	3871.25	2050.50	3434.14	2095.74	5921.76	5529.89	7.09%
14	Milan	0.209	3818.21	2050.85	3386.32	2098.82	5869.06	5485.14	7.00%
15	Milan	0.215	3880.22	2053.96	3443.10	2100.12	5934.19	5543.22	7.05%
16	Milan	0.169	3497.94	2081.00	3091.70	2132.88	5578.93	5224.58	6.78%
17	Milan	0.192	3685.04	2067.26	3263.15	2116.32	5752.30	5379.47	6.93%
18	Milan	0.227	3954.73	2034.51	3512.64	2081.42	5989.23	5594.07	7.06%
19	Milan	0.216	3909.99	2072.53	3471.62	2115.83	5982.52	5587.45	7.07%
20	Milan	0.216	4034.31	2033.05	3593.85	2070.04	6067.37	5663.89	7.12%

Tabella 27: Trasmittanza Termica delle Strutture Opache e Fabbisogni di Energia Utile per Tipologia di Edificio (Milano)

Dal grafico 37 si nota un fabbisogno di energia invernale superiore nel caso di edificio privo di sottotetto, mentre nel periodo estivo si ottiene il risultato opposto, ovvero il fabbisogno di energia risulta superiore nel caso di edificio dotato di sottotetto pur avendo un maggiore volume climatizzato. Osservando le linee di tendenza è possibile notare come nel periodo estivo si abbia poca differenza nei fabbisogni tra le due tipologie di edificio (le linee sono molto vicine tra loro), mentre nel caso invernale si ha una maggiore differenza poiché le linee di tendenza risultano molto più lontane tra loro. Confrontando i fabbisogni totali (grafico 38) si nota appunto come l'edificio dotato di sottotetto abbia un fabbisogno totale minore durante tutto l'anno, mentre l'edificio privo di sottotetto rispetto a quest'ultimo risulta avere un aumento di fabbisogno percentuale medio pari al 7%.

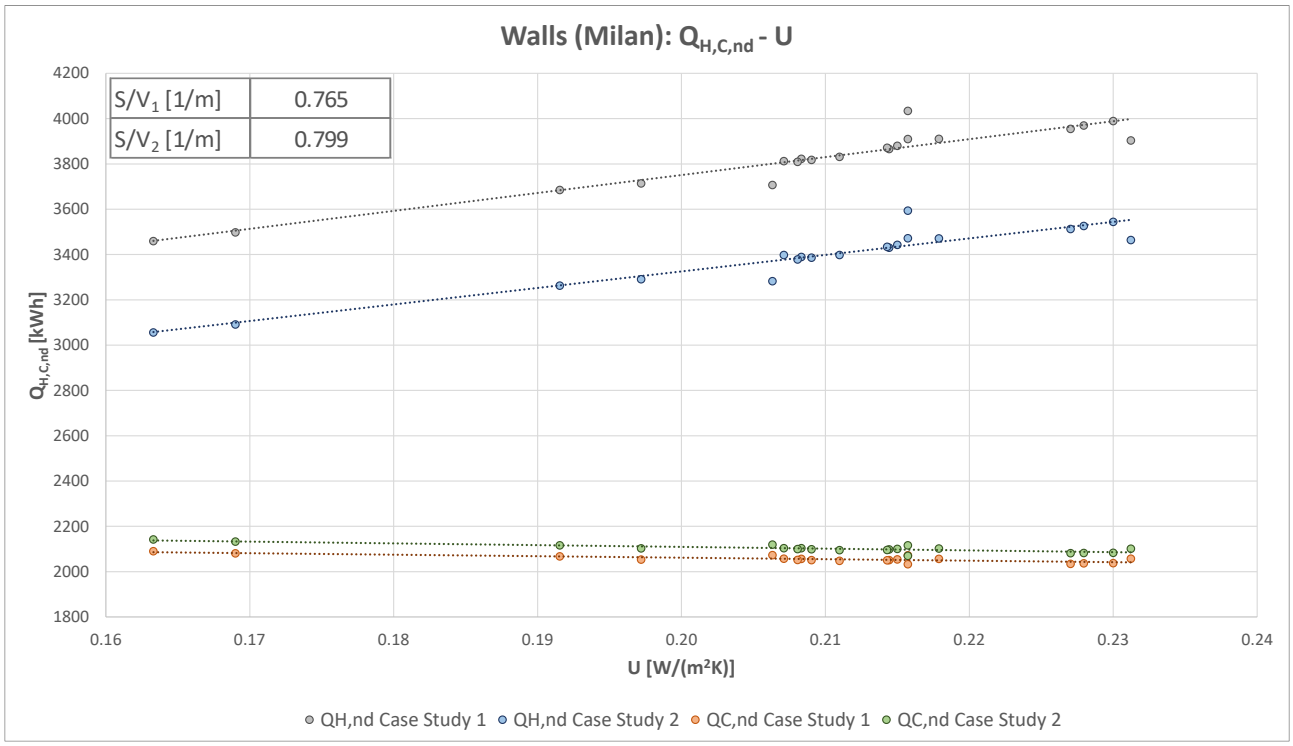

Grafico 37: Rapporto tra Fabbisogno Invernale ed Estivo e Trasmittanza Termica

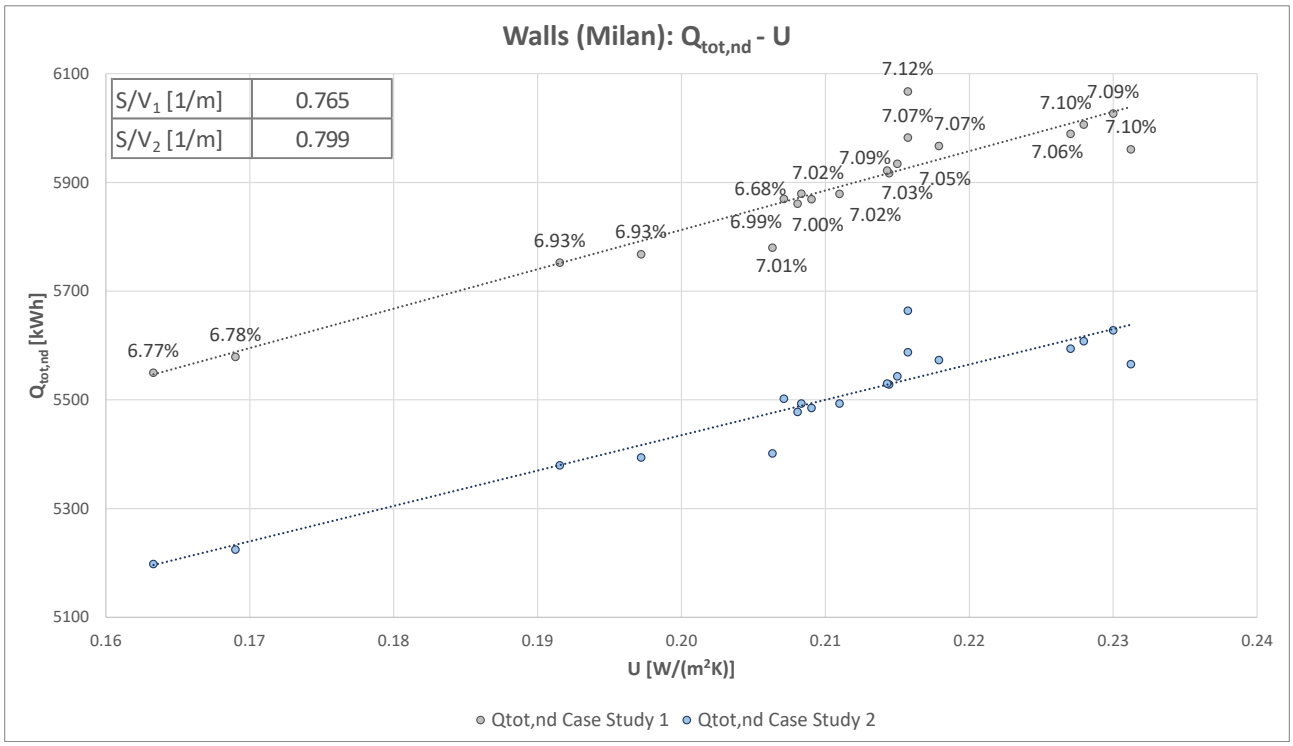

Grafico 38: Rapporto tra Fabbisogno Totale e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano l'Aumento Percentuale del Fabbisogno Riferito all''Edificio Privo di Sottotetto Rispetto all'Edificio Dotato di Sottotetto

4.3.2 Roma

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Heating Energy Need $Q_{H,nd}$ Case Study 1	Cooling Energy Need $Q_{C,nd}$ Case Study 1	Heating Energy Need $Q_{H,nd}$ Case Study 2	Cooling Energy Need $Q_{C,nd}$ Case Study 2	Total Energy Need $Q_{tot,nd}$ Case Study 1	Total Energy Need $Q_{tot,nd}$ Case Study 2	$Q_{tot,nd}$ Percentage Increase %
-	-	[W/(m²K)]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[-]
1	Rome	0.208	938.98	6163.68	780.10	6312.66	7102.66	7092.76	0.14%
2	Rome	0.228	1030.98	6059.74	839.55	6256.68	7090.71	7096.23	-0.08%
3	Rome	0.214	983.68	6099.17	799.56	6297.20	7082.84	7096.76	-0.20%
4	Rome	0.207	955.19	6115.94	774.15	6312.87	7071.14	7087.03	-0.22%
5	Rome	0.197	876.35	6170.91	724.34	6320.10	7047.26	7044.44	0.04%
6	Rome	0.230	1045.96	6060.52	875.12	6211.19	7106.48	7086.31	0.28%
7	Rome	0.239	1067.13	6112.50	916.49	6213.11	7179.63	7129.59	0.70%
8	Rome	0.218	989.18	6153.82	825.62	6302.82	7143.00	7128.44	0.20%
9	Rome	0.231	1003.89	6100.82	816.48	6296.03	7104.70	7112.51	-0.11%
10	Rome	0.163	779.80	6220.60	639.89	6373.03	7000.40	7012.92	-0.18%
11	Rome	0.238	1068.14	6109.88	917.33	6210.51	7178.02	7127.84	0.70%
12	Rome	0.211	960.40	6097.55	798.30	6248.09	7057.95	7046.39	0.16%
13	Rome	0.243	1103.60	6040.33	926.75	6190.50	7143.93	7117.25	0.37%
14	Rome	0.208	951.85	6108.03	791.35	6259.30	7059.88	7050.65	0.13%
15	Rome	0.206	900.86	6150.20	744.42	6297.41	7051.06	7041.83	0.13%
16	Rome	0.214	957.54	6141.75	815.00	6241.19	7099.29	7056.19	0.61%
17	Rome	0.209	955.88	6104.25	794.63	6254.83	7060.12	7049.46	0.15%
18	Rome	0.215	992.80	6102.32	827.94	6252.60	7095.12	7080.54	0.21%
19	Rome	0.169	794.64	6197.55	652.70	6349.16	6992.19	7001.86	-0.14%
20	Rome	0.192	869.13	6197.77	737.17	6300.86	7066.90	7038.03	0.41%
21	Rome	0.227	1024.13	6060.24	855.25	6210.83	7084.38	7066.08	0.26%
22	Rome	0.239	1092.52	6054.21	917.21	6204.48	7146.73	7121.69	0.35%
23	Rome	0.245	1145.93	6080.31	916.49	6213.11	7226.24	7129.59	1.36%
24	Rome	0.245	1294.00	5953.68	947.92	6279.78	7247.67	7227.70	0.28%

Tabella 28: Trasmittanza Termica delle Strutture Opache e Fabbisogni di Energia Utile per Tipologia di Edificio (Roma)

Anche in questo caso il fabbisogno di energia invernale risulta essere superiore per l'edificio privo di sottotetto, mentre il fabbisogno di energia estivo risulta superiore per l'edificio dotato di sottotetto (grafico 39). Nel periodo invernale però le linee di tendenza non risultano molto lontane tra loro come nel caso di Milano, ma si trovano vicine come nel periodo estivo.

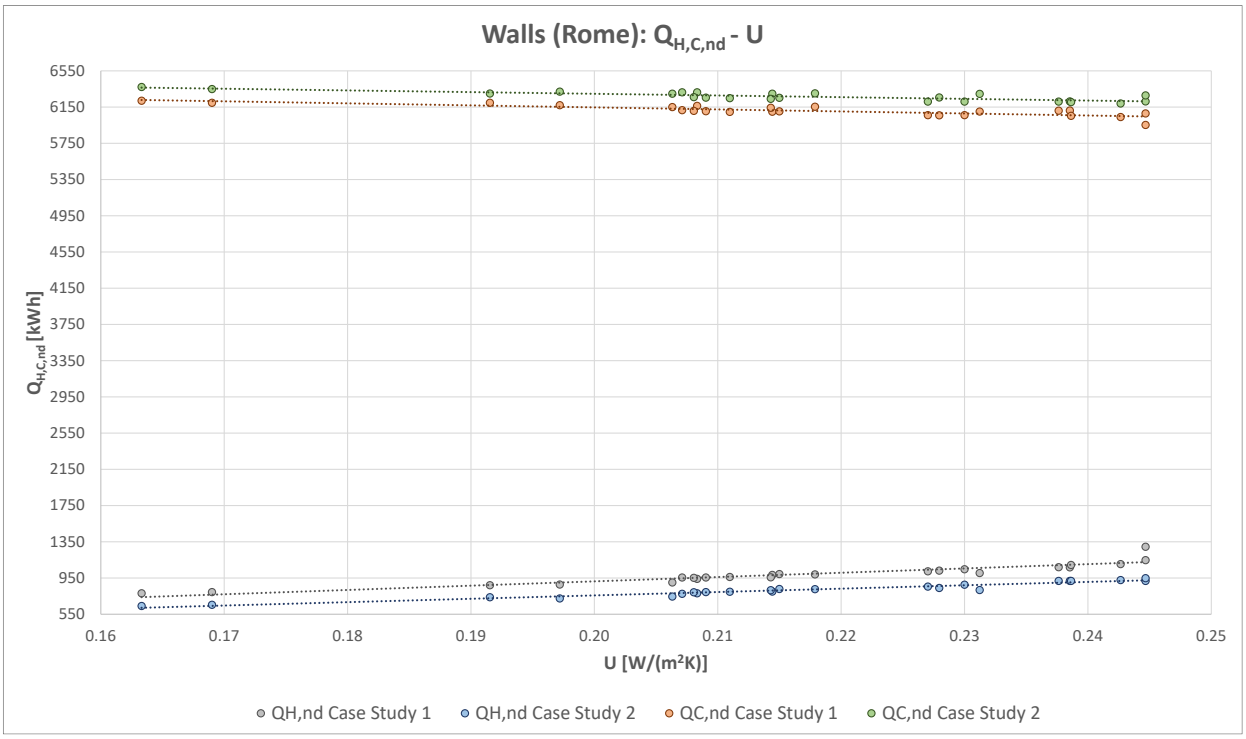

Grafico 39: Rapporto tra Fabbisogno Invernale ed Estivo e Trasmittanza Termica

Analizzando i fabbisogni totali (grafico 40) non si riesce ad evincere quale edificio abbia un fabbisogno di energia minore per Roma, infatti i punti che identificano le due tipologie di edificio si trovano molto vicino fra loro. Questo è dovuto al fatto che sia nel periodo invernale che nel periodo estivo le linee di tendenza sono ravvicinate tra loro. Osservando però l'andamento delle linee di tendenza riguardanti i fabbisogni totali si può notare che per trasmittanze più elevate l'edificio dotato di sottotetto sembrerebbe avere un fabbisogno di energia minore, ma la differenza tra i due edifici non è così evidente come nel caso di Milano.

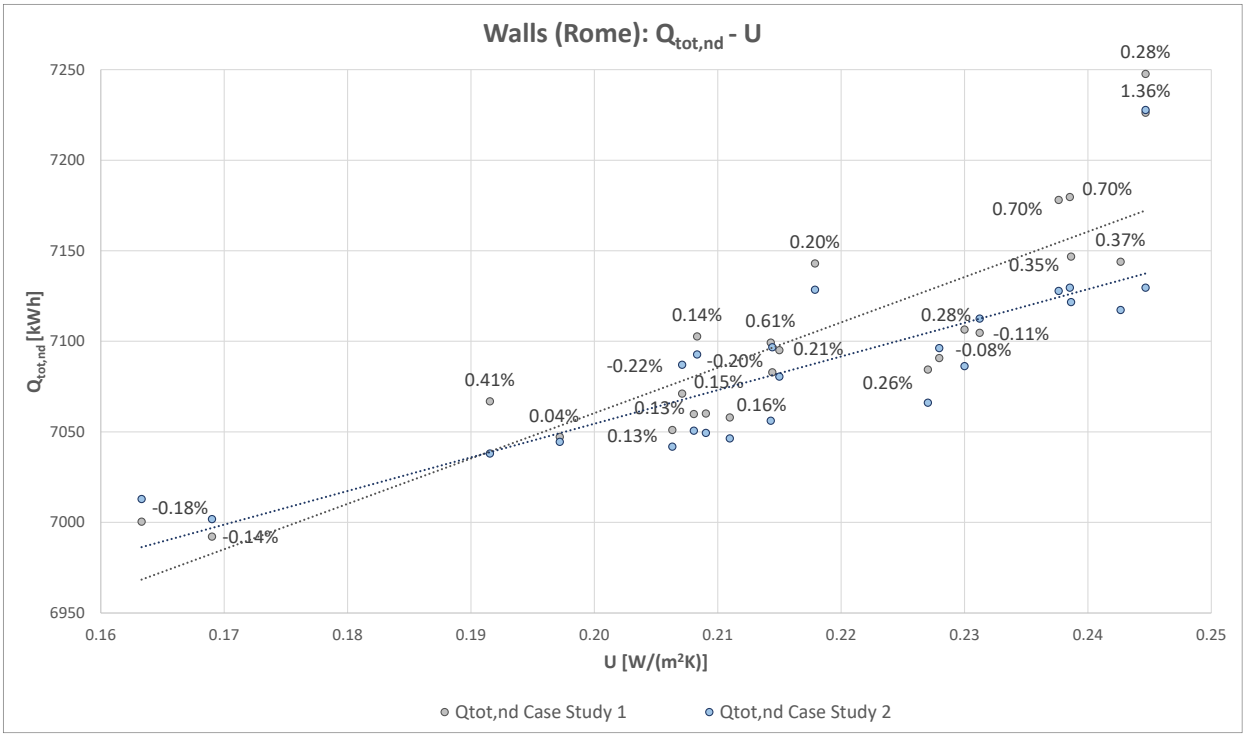

Grafico 40: Rapporto tra Fabbisogno Totale e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano l'Aumento Percentuale del Fabbisogno Riferito all''Edificio Privo di Sottotetto Rispetto all'Edificio Dotato di Sottotetto

4.3.3 Palermo

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Heating Energy Need $Q_{H,nd}$ Case Study 1	Cooling Energy Need $Q_{C,nd}$ Case Study 1	Heating Energy Need $Q_{H,nd}$ Case Study 2	Cooling Energy Need $Q_{C,nd}$ Case Study 2	Total Energy Need $Q_{tot,nd}$ Case Study 1	Total Energy Need $Q_{tot,nd}$ Case Study 2	$Q_{tot,nd}$ Percentage Increase %
-	-	[W/(m²K)]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[-]
1	Palermo	0.208	1219.15	3106.37	1093.28	3101.38	4325.52	4194.65	3.12%
2	Palermo	0.228	1343.99	2982.21	1136.95	3093.68	4326.19	4230.63	2.26%
3	Palermo	0.214	1308.74	2988.31	1176.62	2987.38	4297.06	4164.00	3.20%
4	Palermo	0.315	1595.68	2999.06	1440.21	2990.46	4594.74	4430.67	3.70%
5	Palermo	0.343	1581.03	3118.29	1425.28	3103.88	4699.32	4529.17	3.76%
6	Palermo	0.207	1290.58	2989.57	1090.17	3100.34	4280.15	4190.51	2.14%
7	Palermo	0.197	1253.45	2981.13	1125.59	2981.68	4234.57	4107.27	3.10%
8	Palermo	0.230	1274.05	3102.60	1215.63	2983.24	4376.64	4198.87	4.23%
9	Palermo	0.355	1708.00	3002.99	1543.61	2991.00	4710.99	4534.61	3.89%
10	Palermo	0.368	1648.93	3126.30	1572.42	2987.72	4775.22	4560.14	4.72%
11	Palermo	0.356	1618.77	3125.96	1460.31	3110.28	4744.73	4570.59	3.81%
12	Palermo	0.239	1378.29	2994.79	1240.33	2991.76	4373.08	4232.10	3.33%
13	Palermo	0.218	1249.90	3112.62	1191.76	2994.31	4362.51	4186.07	4.22%
14	Palermo	0.231	1323.68	2993.40	1119.46	3103.02	4317.08	4222.48	2.24%
15	Palermo	0.163	1167.92	2995.84	1047.35	2997.88	4163.76	4045.23	2.93%
16	Palermo	0.238	1371.84	2993.96	1241.17	2990.98	4365.79	4232.15	3.16%
17	Palermo	0.370	1641.52	2999.97	1401.36	3108.82	4641.49	4510.18	2.91%
18	Palermo	0.211	1295.41	2983.33	1164.04	2982.77	4278.74	4146.81	3.18%
19	Palermo	0.243	1310.21	3106.44	1249.77	2985.26	4416.65	4235.03	4.29%
20	Palermo	0.208	1288.07	2985.67	1157.65	2985.39	4273.74	4143.04	3.15%
21	Palermo	0.343	1581.74	3121.05	1508.36	2985.99	4702.79	4494.35	4.64%
22	Palermo	0.206	1255.65	2992.59	1126.73	2991.24	4248.24	4117.96	3.16%
23	Palermo	0.214	1235.55	3102.07	1177.54	2983.82	4337.61	4161.37	4.24%
24	Palermo	0.324	1449.74	3115.36	1381.47	2985.60	4565.10	4367.07	4.53%
25	Palermo	0.345	1677.28	2994.65	1514.62	2983.02	4671.93	4497.63	3.88%
26	Palermo	0.209	1292.08	2984.88	1161.23	2984.38	4276.96	4145.61	3.17%
27	Palermo	0.215	1315.08	2991.27	1182.28	2989.78	4306.35	4172.05	3.22%
28	Palermo	0.169	1180.56	2989.76	993.03	3100.60	4170.32	4093.63	1.87%
29	Palermo	0.192	1246.71	2990.12	1051.60	3100.98	4236.82	4152.58	2.03%
30	Palermo	0.227	1337.92	2980.67	1203.34	2979.43	4318.59	4182.77	3.25%
31	Palermo	0.239	1380.08	2991.56	1242.03	2988.70	4371.64	4230.74	3.33%
32	Palermo	0.310	1575.70	2989.63	1342.49	3101.06	4565.33	4443.55	2.74%
33	Palermo	0.333	1742.44	3040.76	1494.65	3148.00	4783.20	4642.65	3.03%
34	Palermo	0.333	1793.61	3014.86	1533.77	3073.62	4808.47	4607.39	4.36%

Tabella 29: Trasmittanza Termica delle Strutture Opache e Fabbisogni di Energia Utile per Tipologia di Edificio (Palermo)

Osservando il grafico 41 si nota nuovamente come il fabbisogno di energia invernale sia superiore per l'edificio privo di sottotetto, ma in questo caso si torna ad avere una discreta distanza tra le due linee di tendenza, come visto per Milano. Il fabbisogno di energia estivo invece ha un andamento diverso rispetto ai casi visti fino ad ora, non apprezzabile dal grafico 41. Analizzando il grafico 42 è possibile notare come i punti che identificano le due tipologie di edificio si trovino vicini tra loro, quindi si può procedere osservando l'andamento delle linee di tendenza, questa volta riguardanti i soli fabbisogni estivi, al fine di comprendere come si comportano le due tipologie di edificio durante il periodo estivo. Osservando tali linee è presumibile affermare che per trasmittanze termiche ridotte (identificate dai limiti per le zone climatiche E ed D) abbia un fabbisogno di energia minore l'edificio privo di sottotetto, mentre per trasmittanze elevate (identificate dal limite dalla zona climatica B, quindi esattamente la zona climatica di Palermo) il fabbisogno di energia minore è attribuibile all'edificio dotato di sottotetto. Come per Roma si può ipotizzare che, per trasmittanze termiche ridotte, la presenza di una zona termica non riscaldata in estate peggiori la situazione, mentre al contrario se si hanno trasmittanze termiche elevate sarà più facile disperdere il calore, portando quindi l'ambiente a temperature minori.

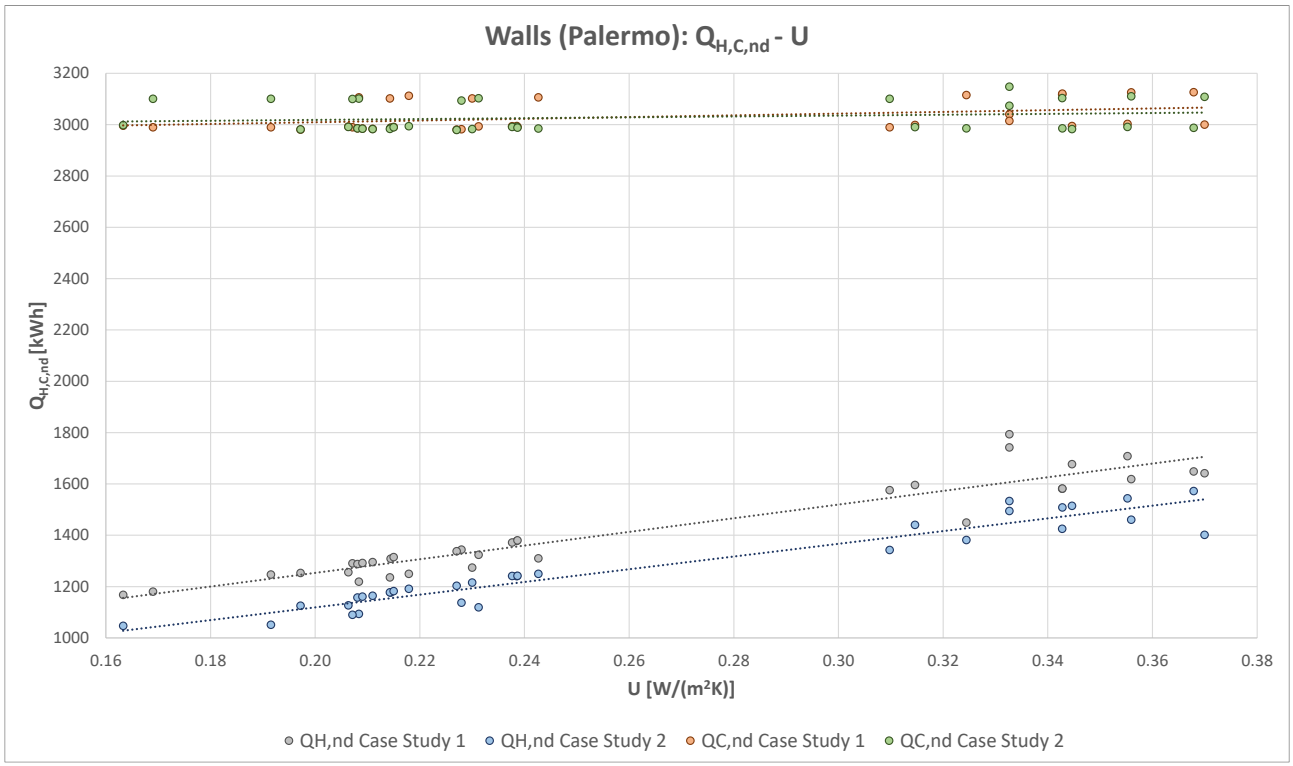

Grafico 41: Rapporto tra Fabbisogno Invernale ed Estivo e Trasmittanza Termica

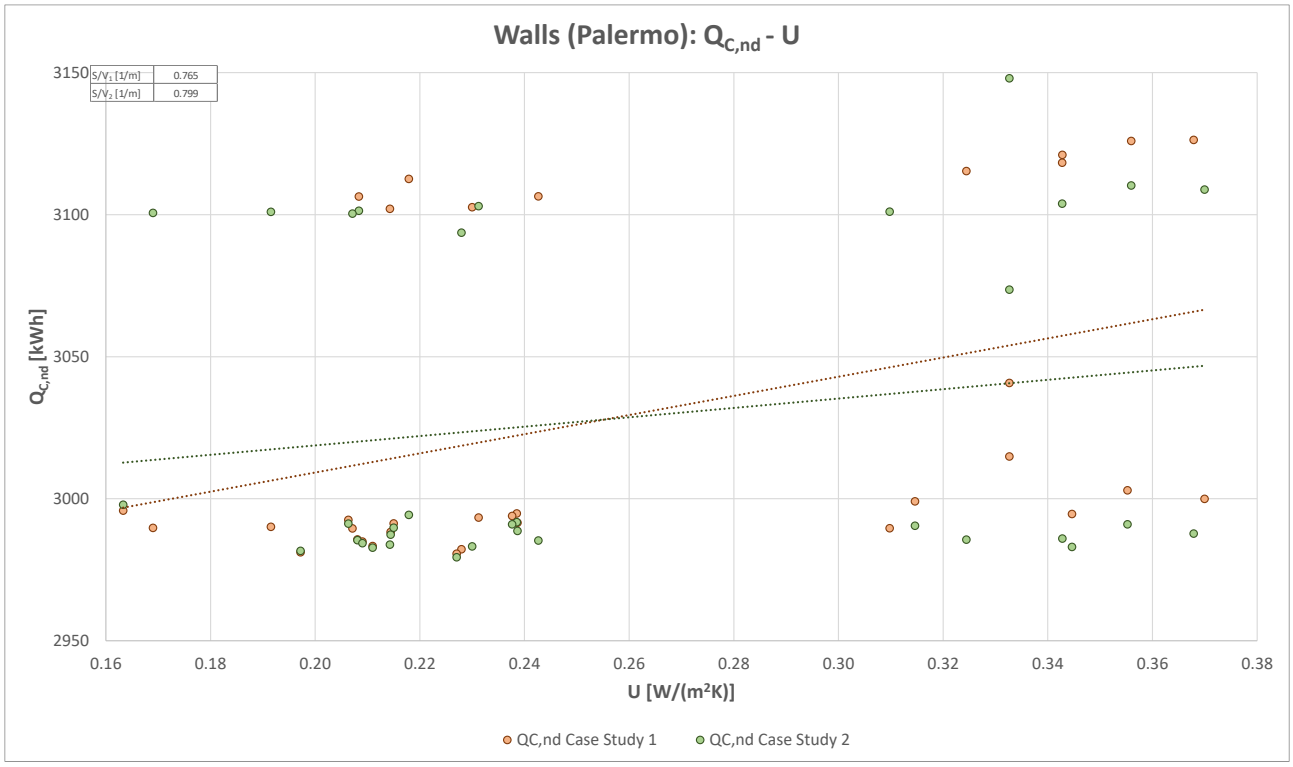

Grafico 42: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Trasmittanza Termica

Confrontando i fabbisogni totali (grafico 43) si nota che durante tutto l'anno l'edificio dotato di sottotetto risulta avere un fabbisogno di energia utile minore rispetto all'edificio privo di sottotetto, pur avendo

l'andamento estivo visto in precedenza. L'edificio privo di sottotetto risulta avere un aumento di fabbisogno percentuale medio pari al 3,38% rispetto all'edificio dotato di sottotetto.

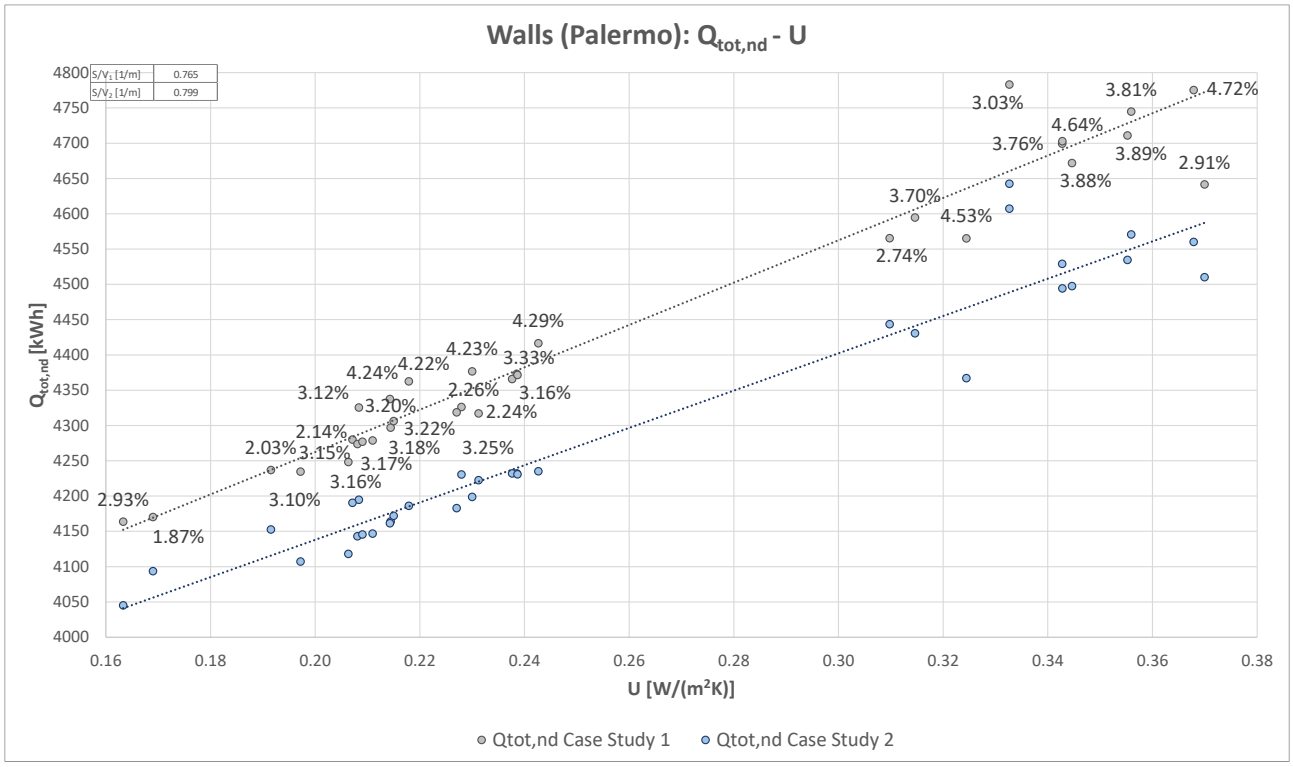

Grafico 43: Rapporto tra Fabbisogno Totale e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano l'Aumento Percentuale del Fabbisogno Riferito all''Edificio Privo di Sottotetto Rispetto all'Edificio Dotato di Sottotetto

In conclusione, confrontando le tre località studiate, si può osservare che:

Nella località di Milano, l'edificio dotato di sottotetto ha un fabbisogno totale annuo minore rispetto all'edificio privo di sottotetto ma quest'ultimo, pur avendo un volume climatizzato maggiore, risulta avere un fabbisogno di energia estivo minore rispetto al caso dotato di sottotetto. Questo può portare ad ipotizzare che la zona non riscaldata, che si forma introducendo il solaio di sottotetto, in estate aumenti in maniera significativa di temperatura peggiorando il comportamento estivo complessivo dell'edificio.

Nella località di Roma non si nota in maniera evidente una differenza tra le due tipologie di edifici.

Nella località di Palermo, ad eccezione del periodo estivo dove il comportamento degli edifici cambia in funzione della trasmittanza termica, si verifica la stessa situazione evidenziata per Milano, con la differenza che la riduzione di fabbisogno di energia annuo dell'edificio dotato di sottotetto rispetto all'edificio privo di sottotetto risulta essere minore rispetto al caso di Milano.

4.4 Valutazione del Fabbisogno di Energia Utile in Funzione dell'Isolamento del Solaio di Sottotetto o della Copertura

In questo paragrafo si affronterà l'analisi riguardante il confronto dei fabbisogni di energia utile, calcolati mediante il metodo dinamico riportato nella norma UNI EN ISO 52016, in funzione della diversa modalità di isolamento del solaio di sottotetto e della copertura, ovvero nel caso in cui si abbia un solaio di sottotetto isolato con copertura non isolata (tipologia di edificio analizzata in precedenza) oppure un solaio di sottotetto non isolato con copertura isolata. Questa analisi è stata proposta poiché con la Legge di Bilancio 2021 (Legge 30/12/2020 n. 178) è stata introdotta la possibilità di usufruire dell'incentivo fiscale (Superbonus 110%) anche sull'isolamento termico della copertura pur in presenza di un sottotetto o soffitta non riscaldati. Nella prima formulazione la normativa non permetteva la detrazione di tale intervento se era presente al di sotto della copertura un ambiente non riscaldato, ora invece gli interventi per la coibentazione della copertura rientrano nella disciplina agevolativa, senza limitare il concetto di superficie disperdente al solo solaio di sottotetto eventualmente esistente. Lo scopo sarà determinare quale dei due interventi sia migliore dal punto di vista dei fabbisogni di energia. L'analisi verrà svolta per le tre diverse località climatiche proposte considerando due tipologie di pareti esterne diverse, cioè utilizzando una struttura massiva e una struttura leggera (acciaio). Per struttura massiva si intende una struttura dotata di elevata massa superficiale ed elevata capacità termica interna k_j, mentre per struttura leggera si intende una struttura dotata di ridotta massa superficiale e ridotta capacità termica interna k_j. L'edificio dotato del solaio di sottotetto isolato e copertura non isolata verrà denominato "Caso Studio 2", mentre l'edificio dotato del solaio di sottotetto non isolato e copertura isolata "Caso Studio 3". Nelle seguenti tabelle sono riportate le caratteristiche riguardanti le pareti, i solai di sottotetto e le coperture. È possibile notare che per ogni località climatica le trasmittanze termiche delle pareti e dei solai rimangano costanti tra una tipologia di struttura e l'altra.

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Total Internal Heat Capacity	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Attenuation f_a	Time Shift ϕ	Areal Internal Heat Capacity k_J	Heating Energy Need $Q_{H,nd}$ Case Study 2	Cooling Energy Need $Q_{C,nd}$ Case Study 2	Total Energy Need $Q_{tot,nd}$ Case Study 2
-	-	[W/(m²K)]	[kg/m²]	[kJ/m²K]	[W/(m²K)]	[-]	[h]	[kJ/(m²K)]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Massive Structure											
1.M	Milan	0.22	227.80	275.80	0.007	0.031	21.92	34.56	3471.17	2101.85	5573.02
2.M	Rome	0.24	228.86	257.10	0.007	0.031	21.10	35.77	916.49	6213.11	7129.59
3.M	Palermo	0.36	274.85	303.00	0.018	0.050	18.55	40.55	1460.31	3110.28	4570.59
Lightweight Structure											
1.L	Milan	0.22	52.13	89.50	0.118	0.547	7.08	21.64	3593.85	2070.04	5663.89
2.L	Rome	0.24	49.63	86.90	0.152	0.623	6.29	22.17	947.92	6279.78	7227.70
3.L	Palermo	0.36	43.38	80.50	0.294	0.807	4.32	22.71	1533.77	3073.62	4607.39

Tabella 30: Caratteristiche Strutture Opache Verticali e Fabbisogni di Energia Utile (Caso Studio 2)

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Total Internal Heat Capacity	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Attenuation f_a	Time Shift ϕ	Areal Internal Heat Capacity k_J	Heating Energy Need $Q_{H,nd}$ Case Study 3	Cooling Energy Need $Q_{C,nd}$ Case Study 3	Total Energy Need $Q_{tot,nd}$ Case Study 3
-	-	[W/(m²K)]	[kg/m²]	[kJ/m²K]	[W/(m²K)]	[-]	[h]	[kJ/(m²K)]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Massive Structure											
1.M	Milan	0.22	227.80	275.80	0.007	0.031	21.92	34.56	3910.21	1964.29	5874.50
2.M	Rome	0.24	228.86	257.10	0.007	0.031	21.10	35.77	1089.40	5929.89	7019.29
3.M	Palermo	0.36	274.85	303.00	0.018	0.050	18.55	40.55	1560.70	3014.10	4574.80
Lightweight Structure											
1.L	Milan	0.22	52.13	89.50	0.118	0.547	7.08	21.64	4044.10	1939.88	5983.98
2.L	Rome	0.24	49.63	86.90	0.152	0.623	6.29	22.17	1291.65	5740.05	7031.70
3.L	Palermo	0.36	43.38	80.50	0.294	0.807	4.32	22.71	1660.41	2984.79	4645.20

Tabella 31: Caratteristiche Strutture Opache Verticali e Fabbisogni di Energia Utile (Caso Studio 3)

Structure	Simulated on	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Attenuation f_a	Time Shift ϕ	Areal Internal Heat Capacity k_J
-	-	[W/(m²K)]	[kg/m²]	[W/(m²K)]	[-]	[h]	[kJ/(m²K)]
Massive Structure							
Sub-Roofing Floor (Not Isolated)	Milan, Rome, Palermo	1.24	360.00	0.413	0.333	8.06	32.52
Roof (Not Isolated)	Milan, Rome, Palermo	0.70	399.20	0.176	0.252	6.47	91.71
Sub-Roofing Floor (Isolated)	Milan	0.24	363.60	0.038	0.155	11.40	58.05
Roof (Isolated)	Milan	0.20	402.80	0.045	0.222	8.20	91.36
Sub-Roofing Floor (Isolated)	Rome	0.27	363.00	0.029	0.107	11.58	34.40
Roof (Isolated)	Rome	0.20	402.80	0.045	0.222	8.20	91.36
Sub-Roofing Floor (Isolated)	Palermo	0.38	362.10	0.064	0.169	10.72	58.45
Roof (Isolated)	Palermo	0.26	401.60	0.061	0.229	7.40	32.22
Lightweight Structure							
Sub-Roofing Floor (Not Isolated)	Milan, Rome, Palermo	1.24	57.50	1.160	0.934	1.46	7.54
Roof (Not Isolated)	Milan, Rome, Palermo	0.68	29.18	0.671	0.991	0.46	2.44
Sub-Roofing Floor (Isolated)	Milan	0.24	70.50	0.195	0.798	4.42	5.96
Roof (Isolated)	Milan	0.19	46.68	0.135	0.707	5.23	6.38
Sub-Roofing Floor (Isolated)	Rome	0.27	68.25	0.217	0.836	3.81	5.24
Roof (Isolated)	Rome	0.21	44.18	0.167	0.786	4.31	6.08
Sub-Roofing Floor (Isolated)	Palermo	0.37	63.25	0.325	0.901	2.45	4.20
Roof (Isolated)	Palermo	0.25	39.43	0.229	0.899	3.06	4.79

Tabella 32: Caratteristiche Strutture Opache Orizzontali e Inclinate (Solai di Sottotetto e Coperture)

4.4.1 Milano

Analizzando i fabbisogni di energia utile associati alla struttura massiva per i due diversi casi (grafico 44), si nota come in inverno l'edificio dotato di solaio di sottotetto isolato necessiti di un minor fabbisogno di energia mentre in estate avrà un fabbisogno di energia maggiore rispetto all'edificio dotato di solaio di sottotetto non isolato. Considerando infine il fabbisogno totale, l'edificio con solaio di sottotetto isolato risulterà avere il comportamento termico migliore, ovvero garantisce il minor fabbisogno. Avendo un fabbisogno invernale maggiore di quello estivo ci si aspetta che il comportamento termico dell'edificio nel periodo invernale abbia un peso maggiore nell'arco di tutto l'anno, infatti l'edificio dotato di solaio di sottotetto isolato, pur avendo un fabbisogno estivo maggiore, risulta in generale più performante rispetto all'edificio con solaio di sottotetto non isolato poiché ha un comportamento termico invernale migliore. Questo porta a preferire per la località di Milano l'isolamento del solaio di sottotetto rispetto all'isolamento della copertura.

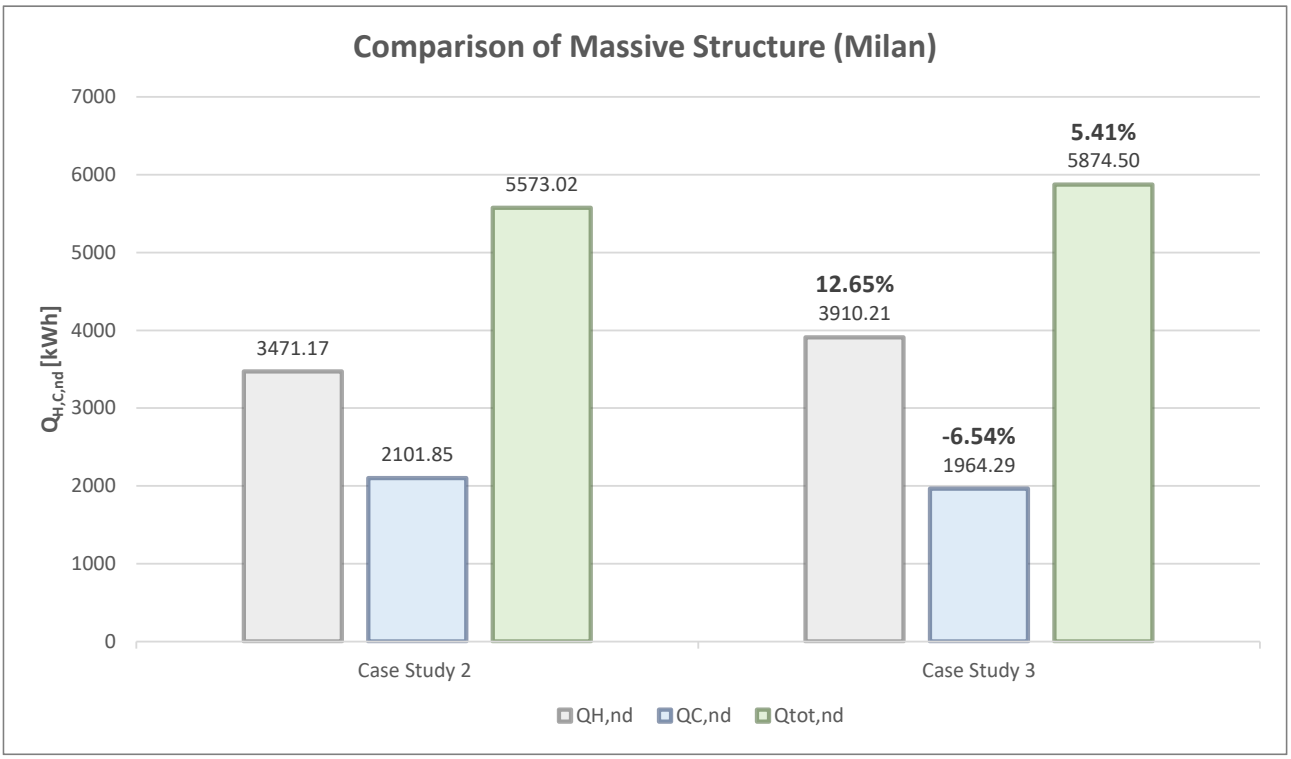

Grafico 44: Struttura Massiva, Confronto Fabbisogni di Energia tra Caso Studio 2 e Caso Studio 3 con Incrementi Percentuali

Andando ad analizzare la struttura leggera al variare dell'isolamento del solaio di sottotetto (grafico 45) si nota come i risultati siano uguali alla struttura massiva, ovvero l'edificio più prestante energeticamente risulta essere sempre l'edificio dotato di solaio di sottotetto isolato. Anche le percentuali di incremento/decremento dei fabbisogni si mantengono circa costanti.

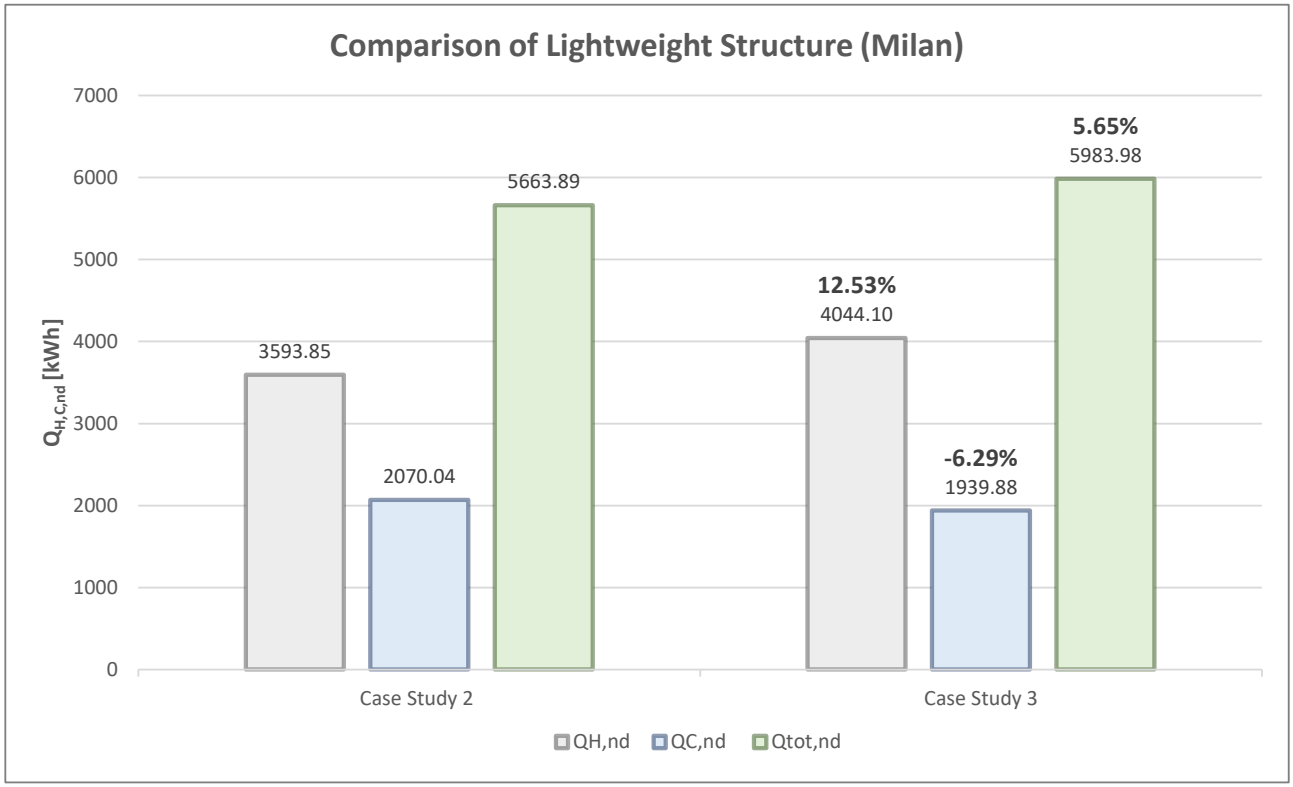

Grafico 45: Struttura Leggera, Confronto Fabbisogni di Energia tra Caso Studio 2 e Caso Studio 3 con Incrementi Percentuali

4.4.2 Roma

Come nel caso di Milano l'edificio dotato di solaio di sottotetto isolato ha un minor fabbisogno invernale e un maggiore fabbisogno estivo rispetto all'edificio dotato solaio di di sottotetto non isolato ma, poiché il fabbisogno estivo risulta essere molto superiore a quello invernale, il comportamento termico estivo dell'edificio avrà un maggior peso rispetto a quello invernale. Per questo motivo l'edificio che complessivamente risulta avere il fabbisogno di energia minore durante l'arco dell'anno è l'edificio dotato di solaio di sottotetto non isolato. Ciò porta a preferire per la località di Roma l'isolamento della copertura rispetto all'isolamento del solaio di sottotetto.

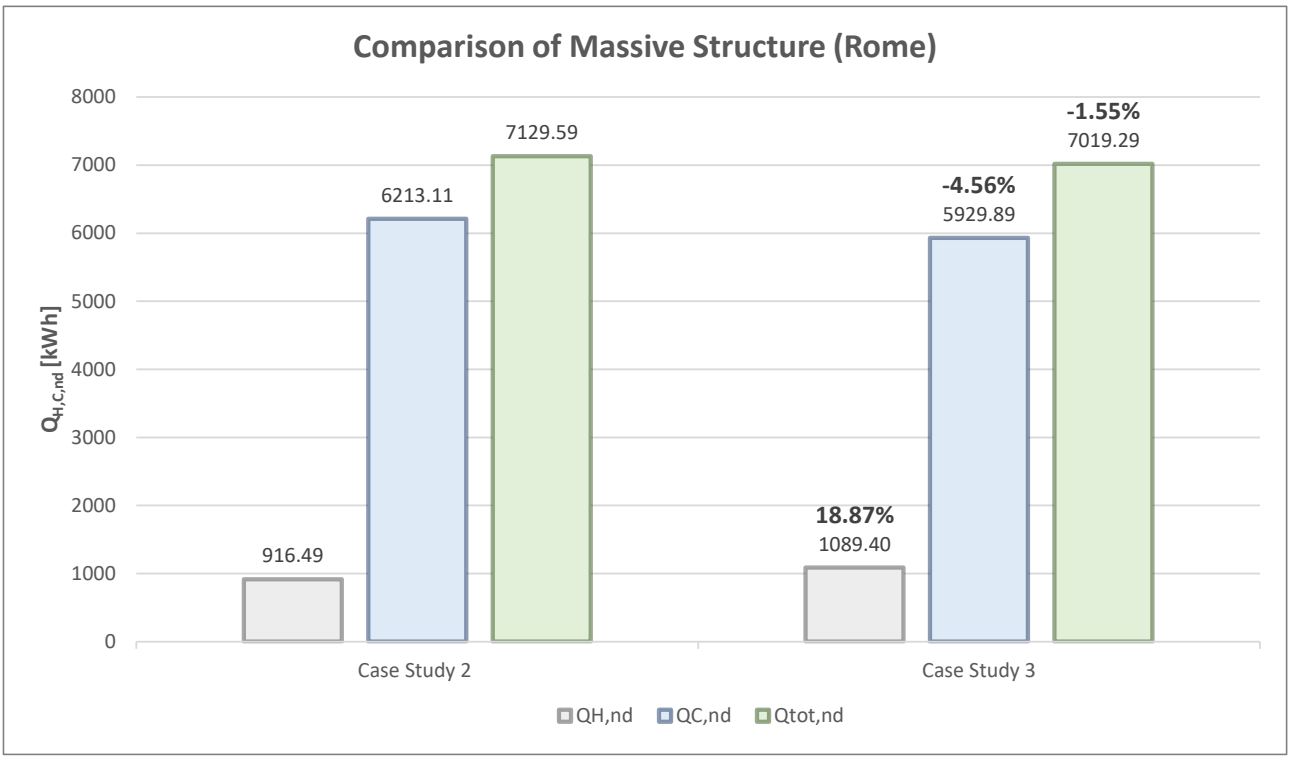

Grafico 46: Struttura Massiva, Confronto Fabbisogni di Energia tra Caso Studio 2 e Caso Studio 3 con Incrementi Percentuali

Analizzando il caso della struttura leggera si nota lo stesso comportamento presente nella struttura massiva, con la differenza che le percentuali di incremento/decremento dei fabbisogni risultano circa il doppio delle precedenti. Questo significa che la differenza di isolamento tra sottotetto e copertura è maggiormente apprezzabile nella struttura leggera rispetto alla struttura massiva.

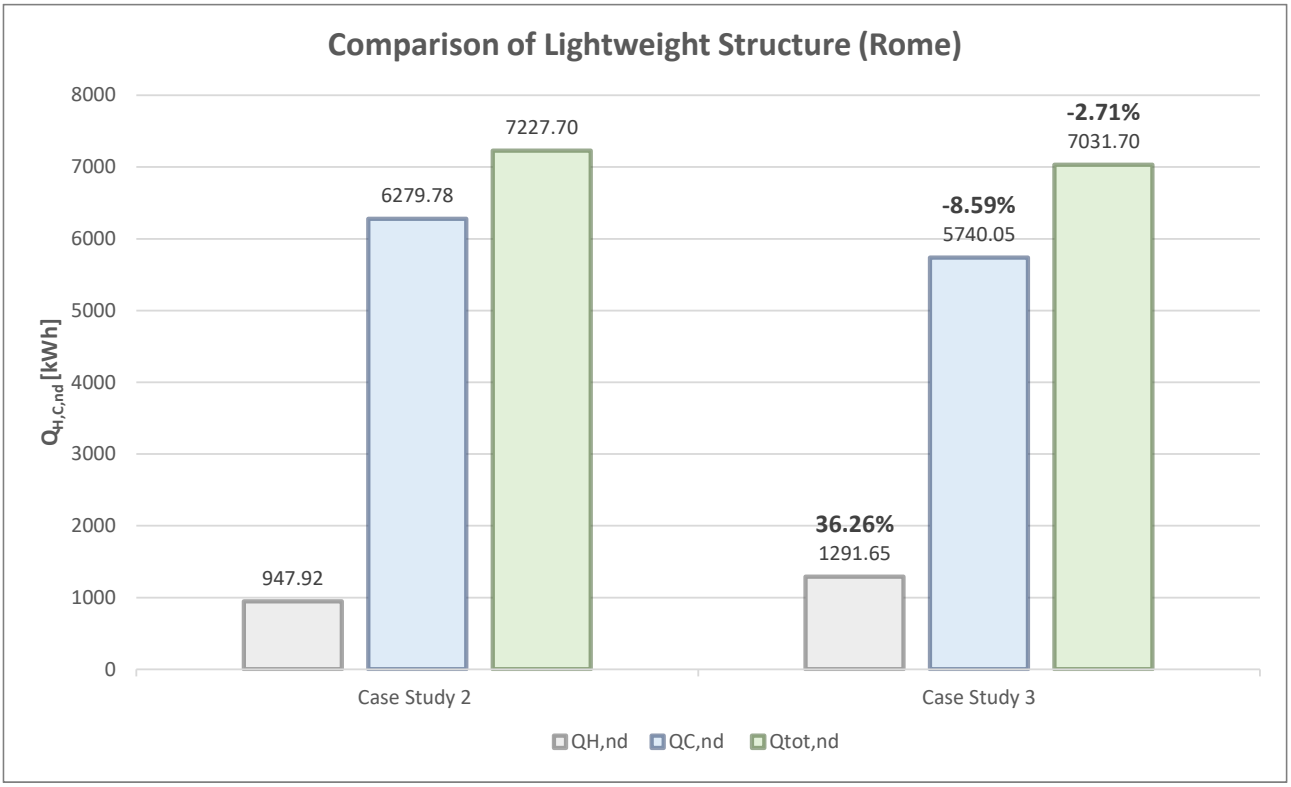

Grafico 47: Struttura Leggera, Confronto Fabbisogni di Energia tra Caso Studio 2 e Caso Studio 3 con Incrementi Percentuali

4.4.3 Palermo

Il comportamento delle due tipologie di isolamento risulta essere sempre lo stesso, ovvero in caso di solaio di sottotetto isolato si avrà un fabbisogno invernale minore, mentre nel caso di solaio di sottotetto non isolato si avrà un fabbisogno estivo minore. Andando però ad analizzare il fabbisogno totale non si nota quale tipologia di isolamento sia migliore per la località di Palermo, poiché il fabbisogno estivo è circa il doppio rispetto a quello invernale, ma in inverno l'isolamento del solaio di sottotetto garantisce una riduzione percentuale maggiore del fabbisogno di energia rispetto al vantaggio che si otterrebbe in estate isolando la copertura.

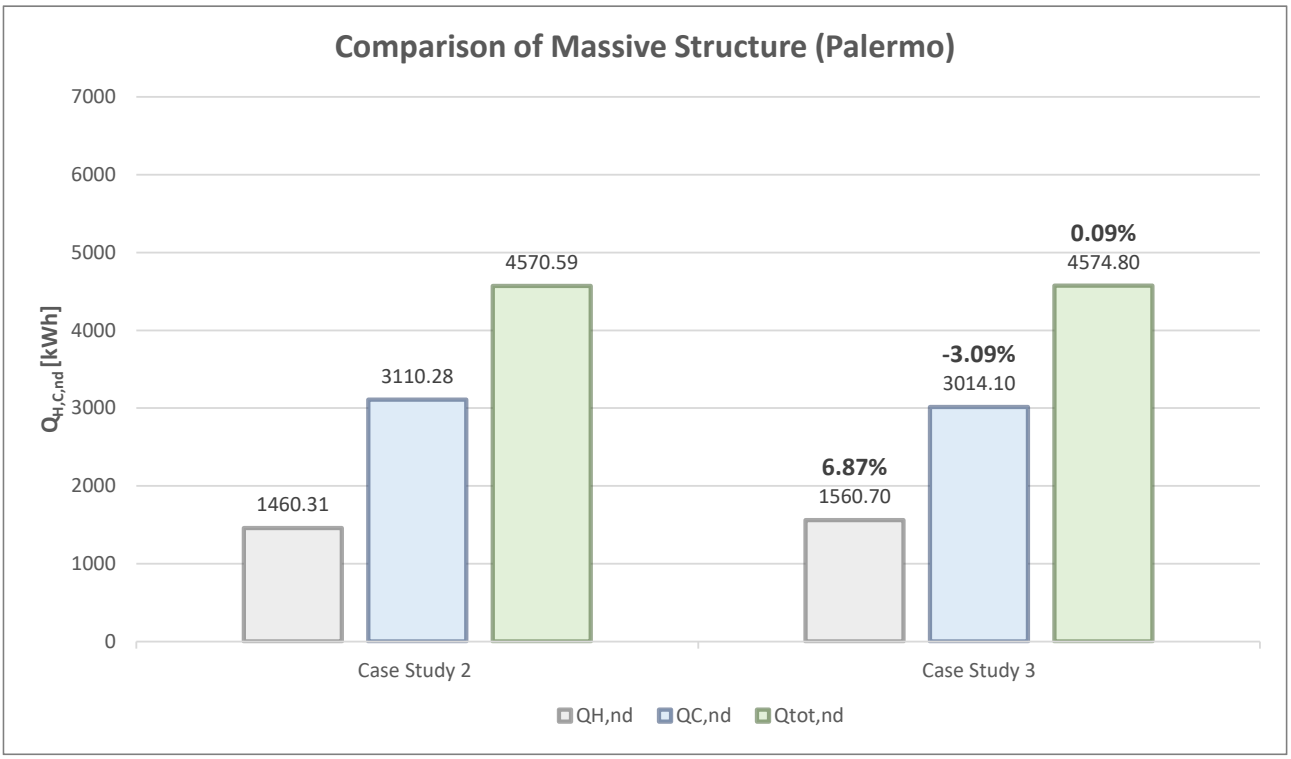

Grafico 48: Struttura Massiva, Confronto Fabbisogni di Energia tra Caso Studio 2 e Caso Studio 3 con Incrementi Percentuali

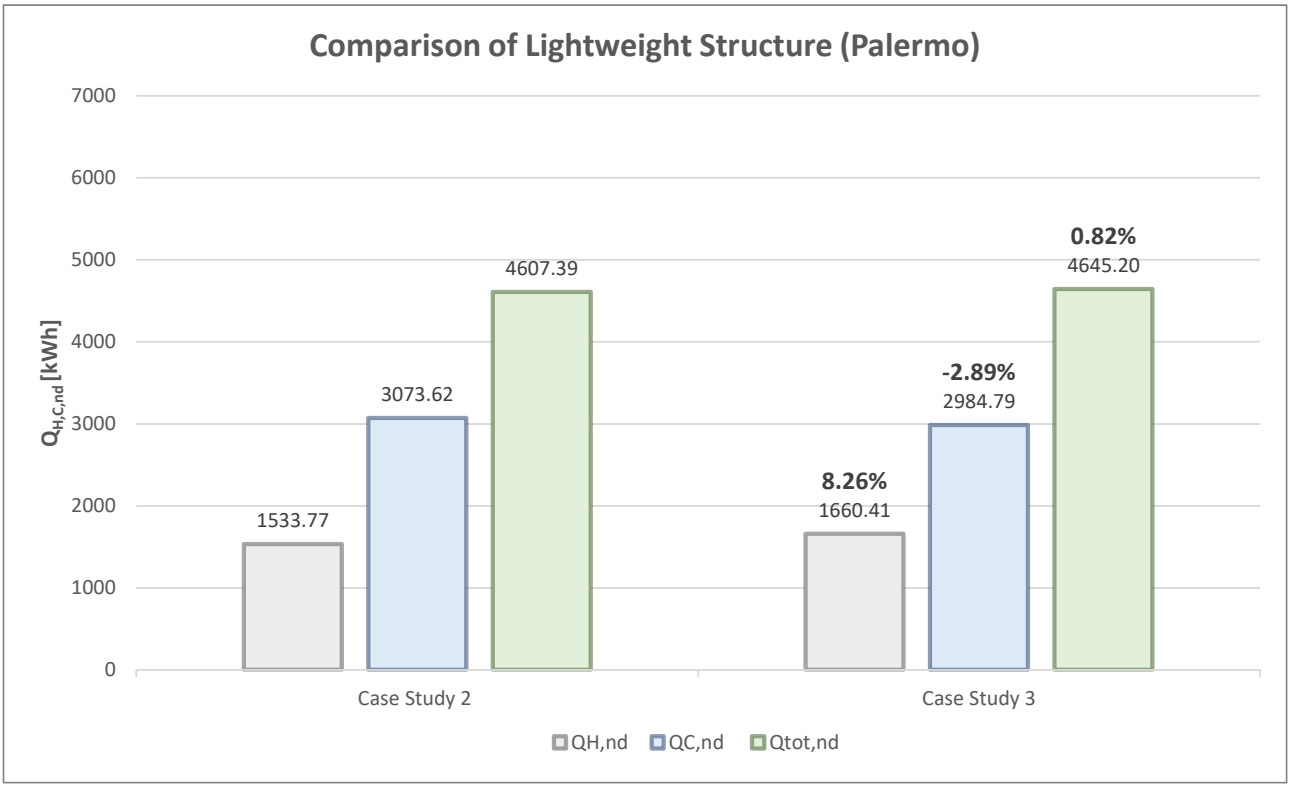

Grafico 49: Struttura Leggera, Confronto Fabbisogni di Energia tra Caso Studio 2 e Caso Studio 3 con Incrementi Percentuali

In conclusione, in funzione della diversa tipologia di isolamento, si può osservare che l'isolamento del solaio di sottotetto, rispetto all'isolamento della copertura, consente di diminuire il fabbisogno invernale molto più rispetto all'aumento che ne consegue del fabbisogno estivo. Da questa affermazione, e come visto nei casi studiati, la scelta di quale solaio isolare dipenderà dall'andamento dei fabbisogni invernali ed estivi: nel caso in cui il fabbisogno invernale sia molto superiore al fabbisogno estivo, l'isolamento converrà predisporlo nel solaio di sottotetto mentre se è il fabbisogno estivo ad essere molto superiore l'isolamento converrà predisporlo in copertura.

Per le diverse località si può invece affermare che:

A Milano per garantire un minore fabbisogno di energia annuo è preferibile predisporre l'isolamento nel solaio di sottotetto piuttosto che in copertura.

A Roma per garantire un minore fabbisogno di energia annuo è preferibile predisporre l'isolamento in copertura piuttosto che nel solaio di sottotetto.

A Palermo non è presente una differenza di fabbisogno di energia annuo significativa tra le due tipologie di isolamento.

Poiché anche nel caso di Milano, dove si ha la maggiore differenza di fabbisogno, la variazione percentuale tra una tipologia di edificio e l'altra non risulta essere particolarmente rilevante, per determinare la struttura migliore occorre analizzare non solo l'aspetto legato al fabbisogno di energia ma anche quello legato al comfort interno. Questo perché se risultasse migliore da un punto di vista del comfort la tipologia di edificio che ha un maggiore fabbisogno di energia, essendo questo incremento di fabbisogno non molto significativo, sicuramente si preferirà la struttura che assicura il miglior comfort interno rispetto alla struttura che assicura un minor fabbisogno.

4.5 Valutazione del Fabbisogno di Energia Utile in Funzione della Tipologia di Struttura (Massiva e Leggera)

In questo paragrafo verrà affrontata l'analisi riguardante il confronto dei fabbisogni di energia utile, calcolati mediante il metodo dinamico riportato nella norma UNI EN ISO 52016, in funzione della tipologia di struttura, ovvero nel caso in cui si abbia una struttura massiva oppure una struttura leggera. Il confronto verrà effettuato sia nel caso di solaio di sottotetto isolato sia nel caso di copertura isolata, quindi verrà mantenuta fissa la tipologia di isolamento mentre a variare saranno le strutture. Come nel paragrafo precedente l'edificio dotato del solaio di sottotetto isolato e copertura non isolata verrà denominato "Caso Studio 2", mentre l'edificio dotato del solaio di sottotetto non isolato e copertura isolata "Caso Studio 3".

.

4.5.1 Milano

Nella tabella 33 sono riportate le caratteristiche di tutti gli elementi costituenti l'edificio al fine di evidenziare le diverse caratteristiche che contraddistinguono una struttura identificata con il termine "massiva" da una struttura identificata con il termine "leggera", in particolare è possibile notare come nella struttura massiva i valori della massa superficiale, dello sfasamento e della capacità termica interna siano notevolmente superiori rispetto alla struttura leggera. La valutazione viene effettuata mantenendo i valori della trasmittanza termica degli elementi verso l'esterno circa costanti tra le due tipologie di strutture, in modo tale che nel caso sia presente un diverso comportamento del fabbisogno di energia esso sia riconducibile alla variazione dei suddetti parametri e non alla variazione di trasmittanza termica.

Structure	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Time Shift ϕ	Attenuation f_a	Areal Internal Heat Capacity k_J
[-]	[W/m^{2}K]	[kg/m^2]	[W/m^{2}K]	[h]	[-]	[kJ/m^{2}K]
Massive Structure						
External Wall	0.22	227.80	0.007	21.92	0.031	34.56
Internal Wall	1.13	111.60	0.673	6.18	0.598	50.99
Internal Floor	0.35	403.80	0.039	12.28	0.111	77.37
Sub-Roofing Floor (Not Isolated)	1.24	360.00	0.413	8.06	0.333	32.52
Sub-Roofing Floor (Isolated)	0.25	363.60	0.038	11.40	0.155	58.05
Roof (Not Isolated)	0.70	399.20	0.176	6.79	0.252	91.71
Roof (Isolated)	0.20	402.80	0.045	8.33	0.222	91.36
Lightweight Structure						
External Wall	0.22	52.93	0.114	7.08	0.531	21.56
Internal Wall	1.43	71.09	1.272	2.60	0.892	30.50
Internal Floor	0.48	339.20	0.156	7.98	0.326	78.48
Sub-Roofing Floor (Not Isolated)	1.24	57.50	1.160	1.46	0.934	7.54
Sub-Roofing Floor (Isolated)	0.24	70.50	0.195	4.42	0.798	5.96
Roof (Not Isolated)	0.68	29.18	0.671	0.77	0.991	2.44
Roof (Isolated)	0.19	46.68	0.135	5.39	0.707	6.38

Tabella 33: Caratteristiche delle Strutture Massive e Leggere Costituenti l'Edificio Oggetto di Studio (Milano)

Nel caso studio 2 (grafico 50) si identifica un miglior comportamento invernale da parte della struttura massiva, mentre nel periodo estivo il minor fabbisogno è assicurato dalla struttura leggera. Considerando il fabbisogno di energia totale la struttura massiva risulta avere un comportamento migliore nell'arco dell'anno rispetto alla struttura leggera, ma comunque la differenza di fabbisogno non risulta essere significativa. In questo caso, essendo il fabbisogno invernale maggiore di quello estivo, il peso del comportamento dell'edificio nel periodo invernale sarà maggiore, infatti come visto la struttura massiva assicura un fabbisogno totale riferito all'anno minore.

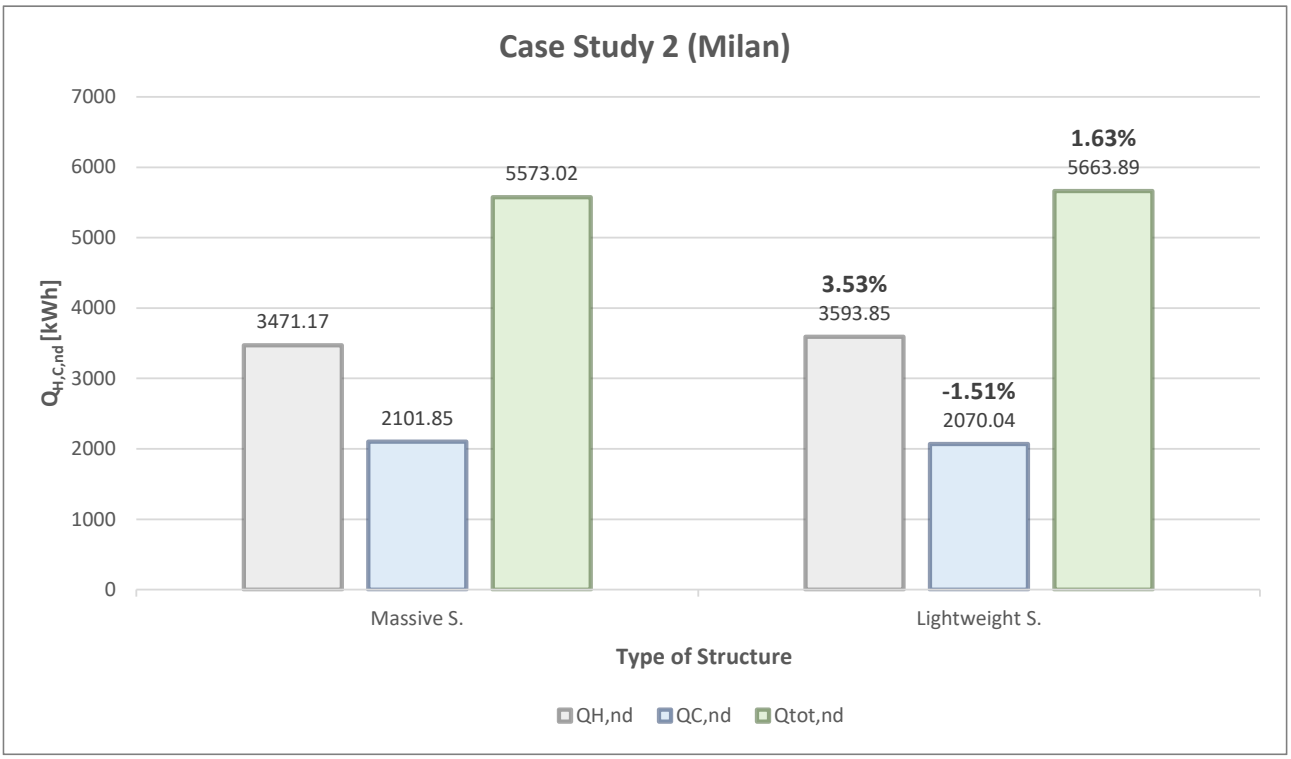

Grafico 50: Caso Studio 2, Confronto Fabbisogni di Energia tra Struttura Massiva e Leggera con Incrementi Percentuali

Nel caso studio 3 si ottengono gli stessi risultati appena analizzati, con percentuali di incremento/decremento dei fabbisogni di energia circa costanti tra i due casi studio.

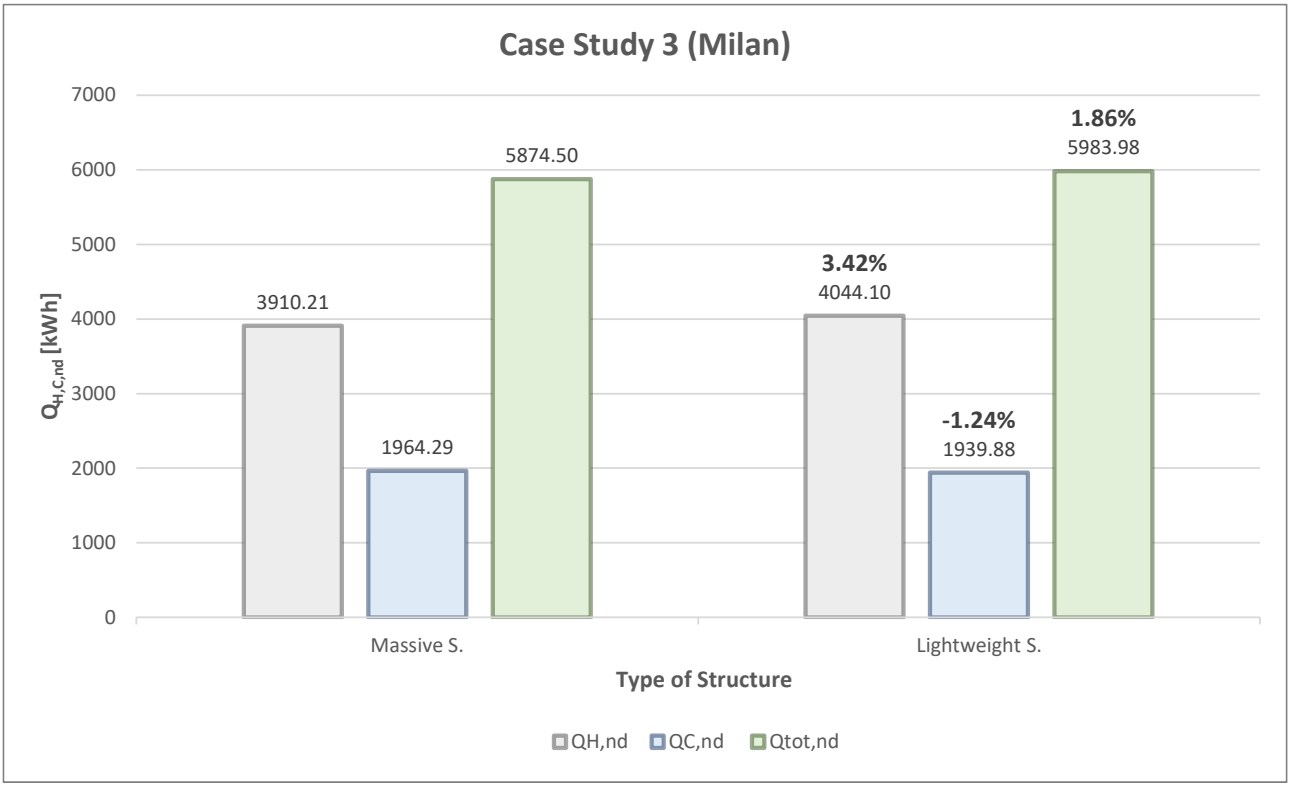

Grafico 51: Caso Studio 3, Confronto Fabbisogni di Energia tra Struttura Massiva e Leggera con Incrementi Percentuali

4.5.1 Roma

Structure	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Time Shift ϕ	Attenuation f_a	Areal Internal Heat Capacity k_J
[-]	[W/m²K]	[kg/m²]	[W/m²K]	[h]	[-]	[kJ/m²K]
Massive Structure						
External Wall	0.24	228.86	0.008	21.04	0.032	35.76
Internal Wall	1.13	111.60	0.673	6.18	0.598	50.99
Internal Floor	0.35	403.80	0.039	12.28	0.111	77.37
Sub-Roofing Floor (Not Isolated)	1.24	360.00	0.413	8.06	0.333	32.52
Sub-Roofing Floor (Isolated)	0.27	363.00	0.029	11.58	0.107	34.40
Roof (Not Isolated)	0.70	399.20	0.176	6.79	0.252	91.71
Roof (Isolated)	0.20	402.80	0.045	8.33	0.222	91.36
Lightweight Structure						
External Wall	0.24	50.43	0.148	6.29	0.606	22.11
Internal Wall	1.43	71.09	1.272	2.60	0.892	30.50
Internal Floor	0.48	339.20	0.156	7.98	0.326	78.48
Sub-Roofing Floor (Not Isolated)	1.24	57.50	1.160	1.46	0.934	7.54
Sub-Roofing Floor (Isolated)	0.26	68.25	0.217	3.81	0.836	5.24
Roof (Not Isolated)	0.68	29.18	0.671	0.77	0.991	2.44
Roof (Isolated)	0.21	44.18	0.167	4.52	0.786	6.08

Tabella 34: Caratteristiche delle Strutture Massive e Leggere Costituenti l'Edificio Oggetto di Studio (Roma)

Nel caso 2, a differenza di Milano, la struttura massiva risulta avere il minor fabbisogno di energia sia nel periodo invernale che in quello estivo, andando di conseguenza ad avere un comportamento termico migliore durante l'arco dell'anno rispetto alla struttura leggera. Anche in questo caso però, analizzando i soli fabbisogno di energia, non vi è una evidente differenza tra le due tipologie di strutture.

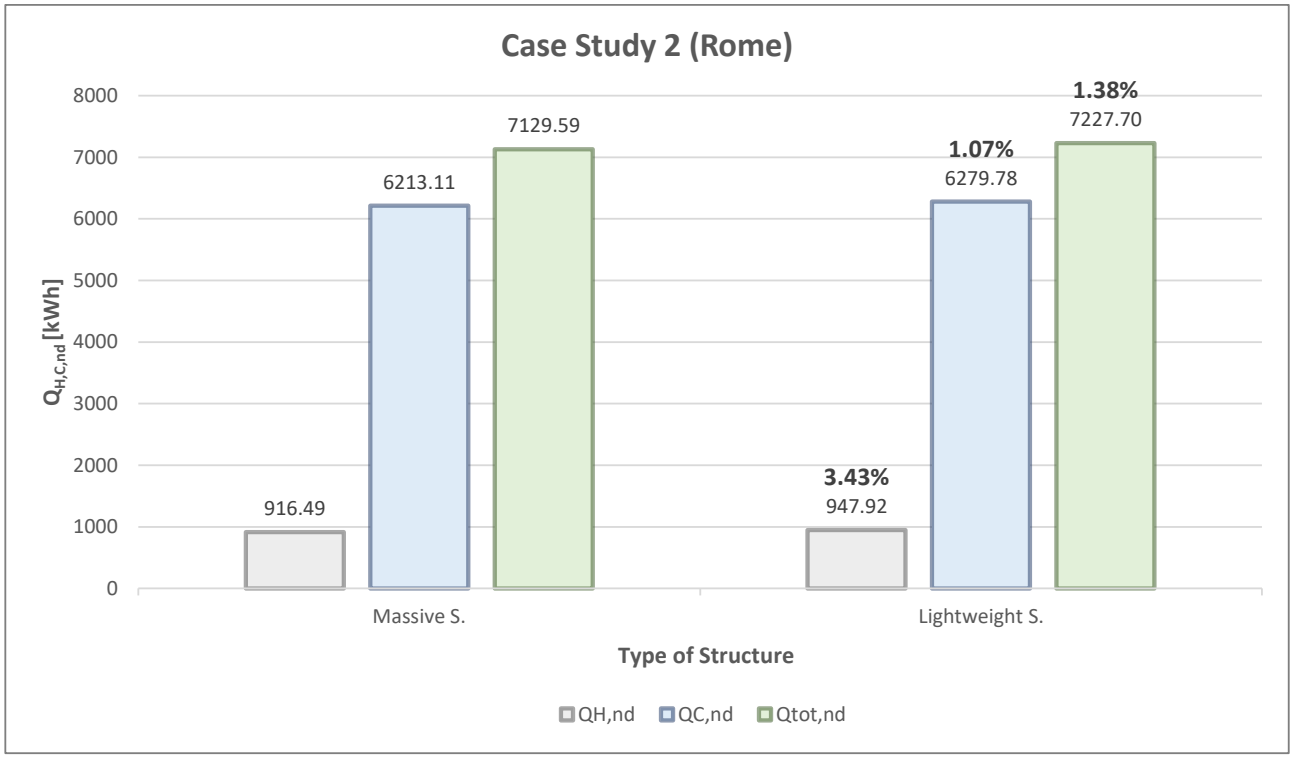

Grafico 52: Caso Studio 2, Confronto Fabbisogni di Energia tra Struttura Massiva e Leggera con Incrementi Percentuali

Nel caso 3 invece (solaio di sottotetto non isolato) è presente un comportamento diverso: nel periodo estivo risulta avere un minor fabbisogno la struttura leggera rispetto a quella massiva, inoltre la differenza tra le due strutture risulta molto più evidente osservando le percentuali di incremento/decremento del fabbisogno di

energia. Anche in questo caso però analizzando i fabbisogni di energia totali non è estremamente evidente la differenza tra le due tipologie di strutture.

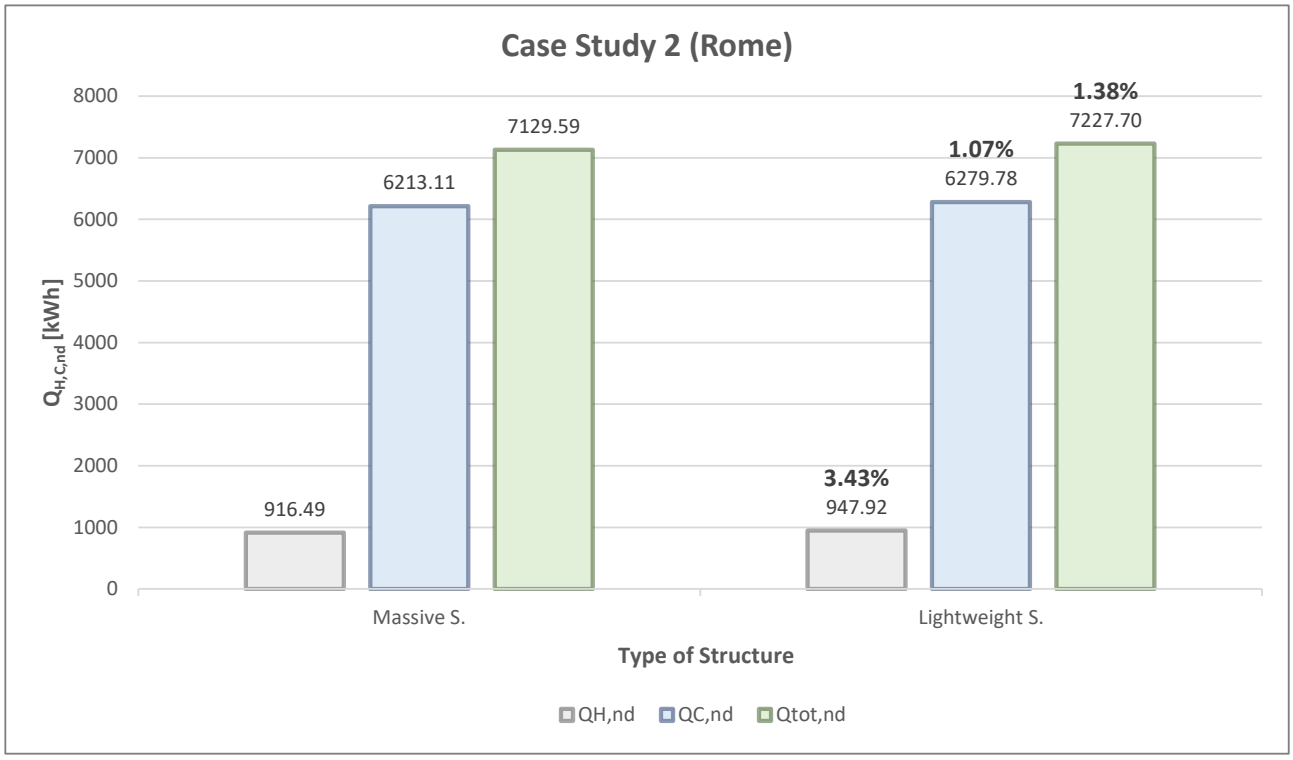

Grafico 53: Caso Studio 3, Confronto Fabbisogni di Energia tra Struttura Massiva e Leggera con Incrementi Percentuali

4.5.1 Palermo

Structure	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Time Shift ϕ	Attenuation f_a	Areal Internal Heat Capacity k_J
[-]	[W/m²K]	[kg/m²]	[W/m²K]	[h]	[-]	[kJ/m²K]
Massive Structure						
External Wall	0.36	274.84	0.018	18.55	0.050	40.55
Internal Wall	1.13	111.60	0.673	6.18	0.598	50.99
Internal Floor	0.35	403.80	0.039	12.28	0.111	77.37
Sub-Roofing Floor (Not Isolated)	1.24	360.00	0.413	8.06	0.333	32.52
Sub-Roofing Floor (Isolated)	0.38	362.10	0.064	10.72	0.169	58.45
Roof (Not Isolated)	0.70	399.20	0.176	6.79	0.252	91.71
Roof (Isolated)	0.26	401.60	0.061	7.66	0.229	91.41
Lightweight Structure						
External Wall	0.36	44.18	0.288	4.32	0.793	22.79
Internal Wall	1.43	71.09	1.272	2.60	0.892	30.50
Internal Floor	0.48	339.20	0.156	7.98	0.326	78.48
Sub-Roofing Floor (Not Isolated)	1.24	57.50	1.160	1.46	0.934	7.54
Sub-Roofing Floor (Isolated)	0.36	63.25	0.325	2.45	0.901	4.20
Roof (Not Isolated)	0.68	29.18	0.671	0.77	0.991	2.44
Roof (Isolated)	0.25	39.43	0.229	3.06	0.899	4.79

Tabella 35: Caratteristiche delle Strutture Massive e Leggere Costituenti l'Edificio Oggetto di Studio (Palermo)

Il comportamento delle due tipologie di strutture a Palermo risulta essere il medesimo studiato per Milano, ovvero la struttura massiva assicura un minor fabbisogno invernale mentre la struttura leggera assicura un

minor fabbisogno estivo. Considerando il fabbisogno di energia totale, come nei casi precedenti, non vi è una significativa differenza che porti a preferire una tipologia di struttura rispetto ad un'altra.

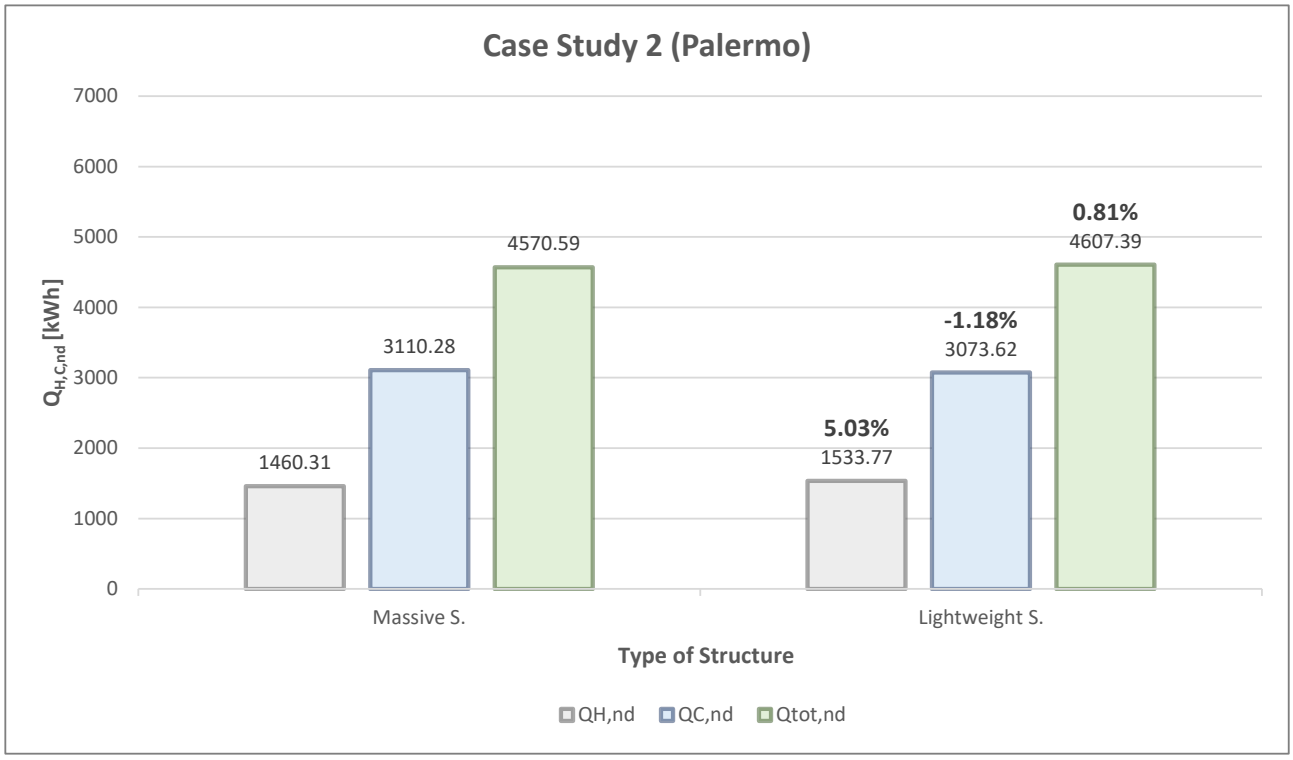

Grafico 54: Caso Studio 2, Confronto Fabbisogni di Energia tra Struttura Massiva e Leggera con Incrementi Percentuali

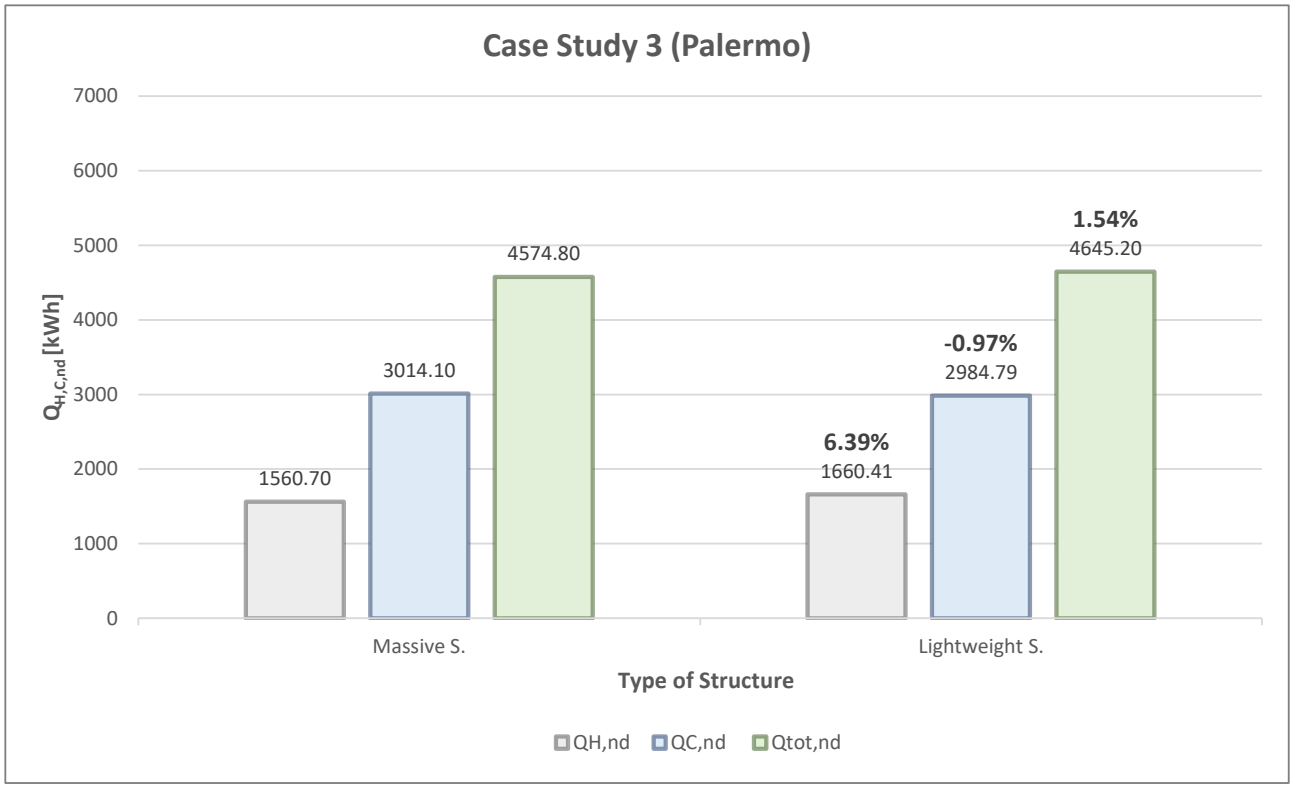

Grafico 55: Caso Studio 3, Confronto Fabbisogni di Energia tra Struttura Massiva e Leggera con Incrementi Percentuali

In conclusione, per tutte le località studiate, non si evidenzia una differenza rilevante nei fabbisogni di energia delle due diverse strutture, si è però notato che la struttura massiva risulta avere un comportamento invernale migliore mentre la struttura leggera risulta avere un comportamento estivo migliore. Quest'analisi però si basa solo sui fabbisogni determinati mediante il metodo dinamico, per completezza deve essere svolta un'analisi riguardo il comfort interno al fine di stabilire quale tra le due tipologie di strutture assicuri un migliore comfort all'interno degli ambienti.

4.6 Approfondimento Paragrafo 4.1: Valutazione del Fabbisogno di Energia Utile Associato ad una Struttura con Capacità Termica Interna Areica Molto Elevata (90 kJ/m^{2}K)

Nel paragrafo 4.1 è stata affrontata la valutazione dell'incidenza di alcuni parametri sul fabbisogno di energia utile, determinato mediante il metodo dinamico riportato nella norma UNI EN ISO 52016. Tra questi parametri è presente la capacità termica interna areica. In questo approfondimento verranno inserite, tra le strutture opache verticali esterne già proposte, delle ulteriori strutture (una per ogni località) caratterizzate da una capacità termica interna areica molto superiore rispetto alle strutture precedentemente considerate. L'obiettivo di questa analisi è valutare in modo più approfondito l'incidenza sui fabbisogni di energia utile della capacità termica interna areica, con lo scopo di ottenere ulteriori informazioni rispetto a quanto già analizzato nel paragrafo 4.1. Questo sarà possibile introducendo appunto strutture con capacità termica interna areica molto superiore rispetto alle strutture già analizzate. Di seguito sono riportati i parametri associati alle nuove strutture introdotte per questo studio, in particolare tali strutture sono caratterizzate da una capacità termica interna areica pari a circa 90 kJ/m^{2}K.

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Total Internal Heat Capacity	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Attenuation f_a	Time Shift ϕ	Areal Internal Heat Capacity k_J	Heating Energy Need $Q_{H,nd}$	Cooling Energy Need $Q_{C,nd}$
-	-	[W/(m²K)]	[kg/m²]	[kJ/m²K]	[W/(m²K)]	[-]	[h]	[kJ/(m²K)]	[kWh]	[kWh]
25	Milan	0.218	620.00	620.60	0.033	0.150	13.22	89.23	3886.01	2033.36
29	Rome	0.247	617.50	618.00	0.04	0.163	12.33	89.38	1065.92	6037.33
43	Palermo	0.336	612.50	612.90	0.062	0.184	11.50	89.69	1565.98	3097.32

Tabella 36: Caratteristiche delle Strutture Opache con Capacità Termica Interna Areica Elevata e Fabbisogni di Energia Utile

4.6.1 Milano

Inserendo la nuova struttura introdotta nei grafici precedentemente realizzati (paragrafo 4.1.1), è possibile notare come il punto che la identifichi si trovi posizionato al di sotto degli altri punti caratterizzati da trasmittanze termiche simili e minore capacità termica interna areica, ma non è posizionato particolarmente in basso rispetto alla linea di tendenza.

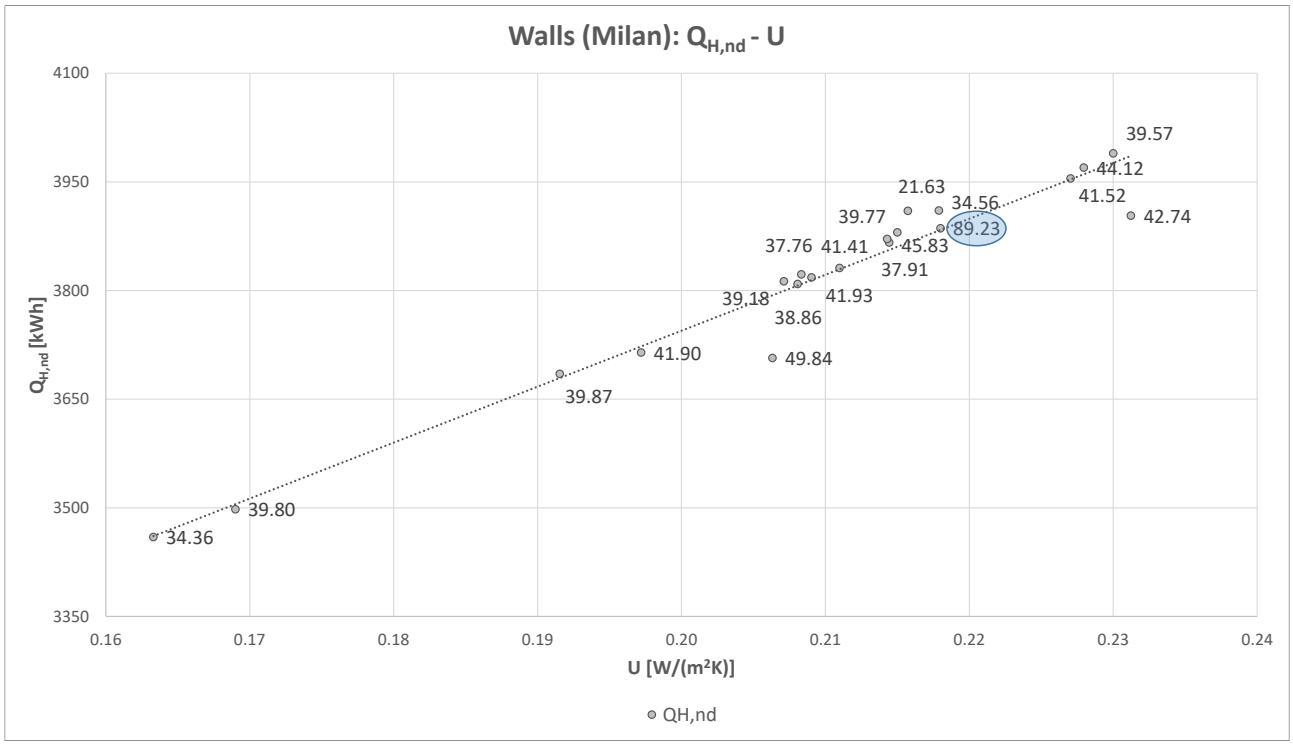

Grafico 56: Rapporto tra Fabbisogno Invernale e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Capacità Termica Interna [kJ/(m²K)]

Nel periodo estivo invece, dove la capacità termica interna non sembra seguire un particolare andamento, il punto associato alla nuova struttura si trova più in basso rispetto a tutti gli altri punti, assicurando quindi un minor fabbisogno di energia per il raffrescamento rispetto a tutte le altre strutture proposte

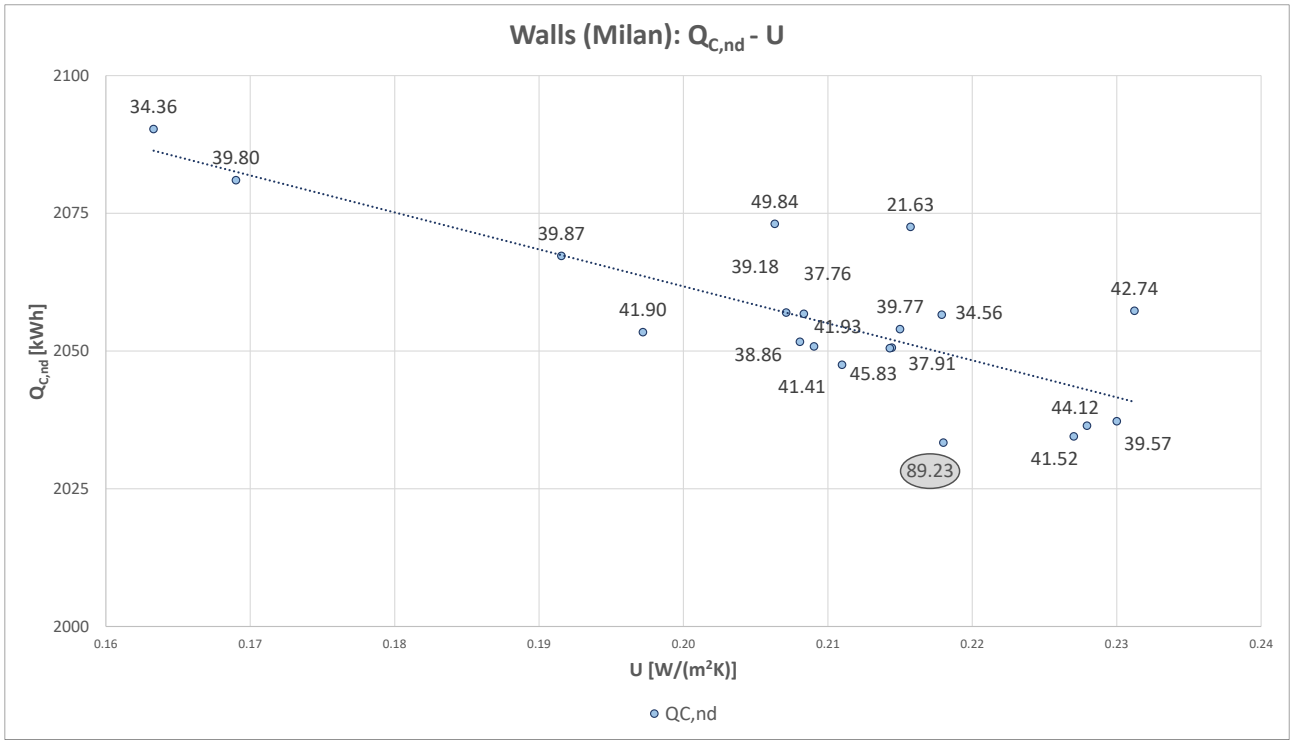

Grafico 57: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Capacità Termica Interna [kJ/(m²K)]

Poiché in queste analisi non sono presenti altre pareti caratterizzate da capacità termiche interne elevate come quest'ultima struttura introdotta, i grafici analizzati saranno prevalentemente influenzati da capacità

termiche ridotte. Quindi per approfondire l'incidenza della capacità termica interna areica sono stati realizzati ulteriori grafici che comparano i fabbisogni di energia utile associati alla nuova struttura rispetto ai fabbisogni di energia utile di altre cinque strutture, caratterizzate da trasmittanza termica simile alla nuova struttura introdotta ma minore capacità termica interna areica.

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Total Internal Heat Capacity	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Attenuation f_a	Time Shift ϕ	Areal Internal Heat Capacity k_J	Heating Energy Need $Q_{H,nd}$	Cooling Energy Need $Q_{C,nd}$	$Q_{H,nd}$ Percentage Increase %	$Q_{C,nd}$ Percentage Increase %
-	-	[W/(m²K)]	[kg/m²]	[kJ/m²K]	[W/(m²K)]	[-]	[h]	[kJ/(m²K)]	[kWh]	[kWh]	[-]	[-]
3	Milan	0.214	373.50	421.50	0.001	0.006	28.78	37.91	3866.30	2050.62	-0.51%	0.85%
7	Milan	0.218	227.80	275.80	0.007	0.031	21.92	34.56	3910.50	2056.61	0.63%	1.14%
13	Milan	0.214	239.80	262.40	0.023	0.109	12.88	45.83	3871.25	2050.50	-0.38%	0.84%
15	Milan	0.215	287.00	351.00	0.003	0.015	25.35	39.77	3880.22	2053.96	-0.15%	1.01%
19	Milan	0.216	52.13	71.50	0.12	0.554	6.67	21.63	3909.99	2072.53	0.62%	1.93%
25	Milan	0.218	620.00	620.60	0.033	0.150	13.22	89.23	3886.01	2033.36	0.00%	0.00%

Tabella 37: Caratteristiche delle Strutture Opache con Trasmittanza Termica Simile e Fabbisogni di Energia Utile

Dal grafico seguente è possibile notare come il fabbisogno di energia utile per il riscaldamento non risulti sempre maggiore nelle strutture caratterizzate da capacità termica interna minore, mentre nel periodo estivo il fabbisogno di energia utile risulta sempre superiore rispetto alla struttura con capacità termica interna più elevata. Questo significa che il vantaggio che si ottiene dall'aumento di capacità termica interna risulta più evidente nel periodo estivo rispetto al periodo invernale, aspetto che nei grafici precedenti non è stato possibile evidenziare.

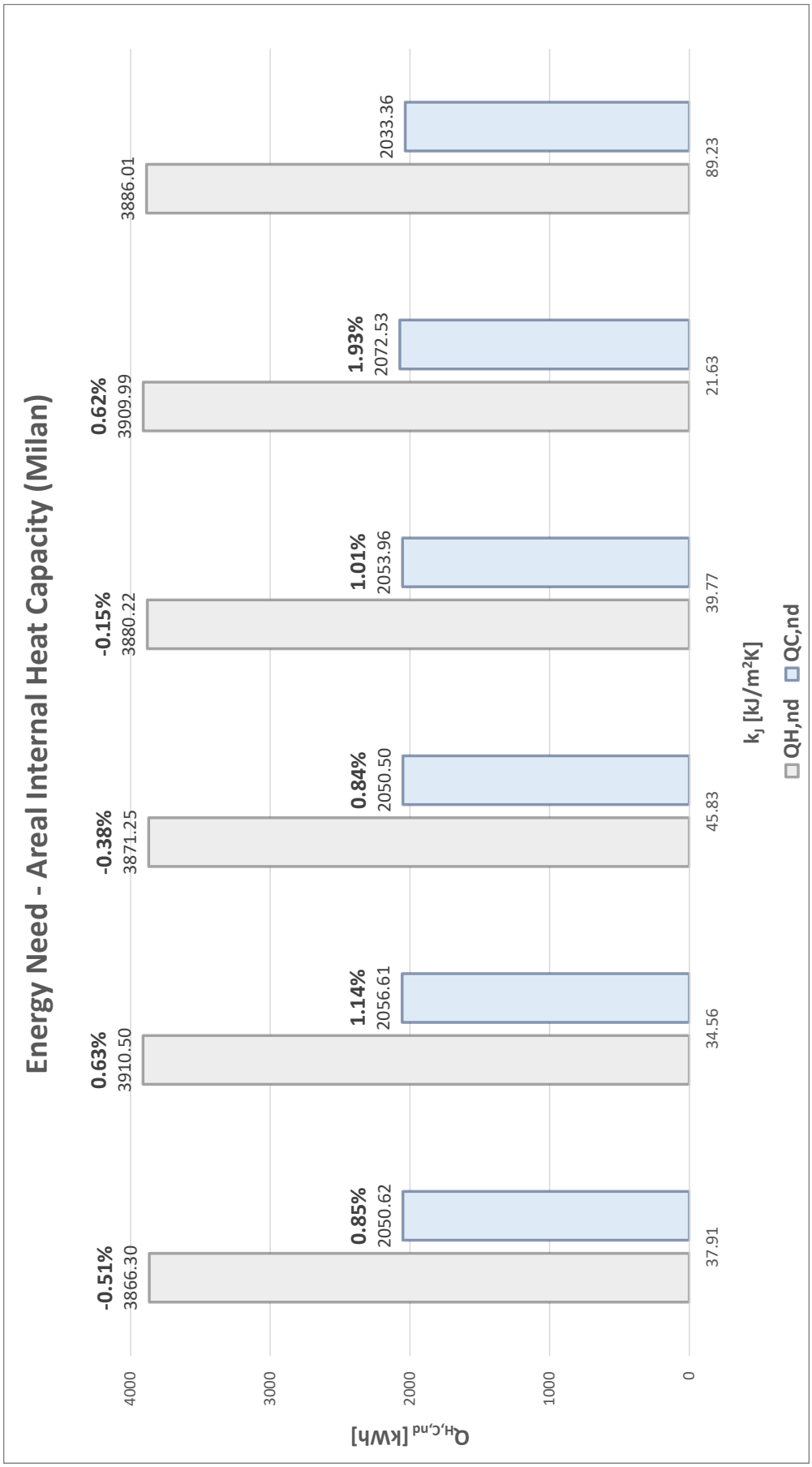

Grafico 58: Fabbisogni di Energia Utile in Funzione della Diversa Capacità Termica Interna Areica, con Variazione Percentuale Rispetto ai Fabbisogni Associati alla Struttura con Capacità Termica Interna Areica Superiore (89,23 kJ/m²K)

4.6.2 Roma

Come per Milano, inserendo la nuova struttura nei grafici precedentemente realizzati (paragrafo 4.1.2), è possibile notare come il punto che la identifichi si trovi posizionato al di sotto degli altri punti caratterizzati da trasmittanze termiche simili e minore capacità termica interna areica, ma non è posizionato particolarmente in basso rispetto alla linea di tendenza.

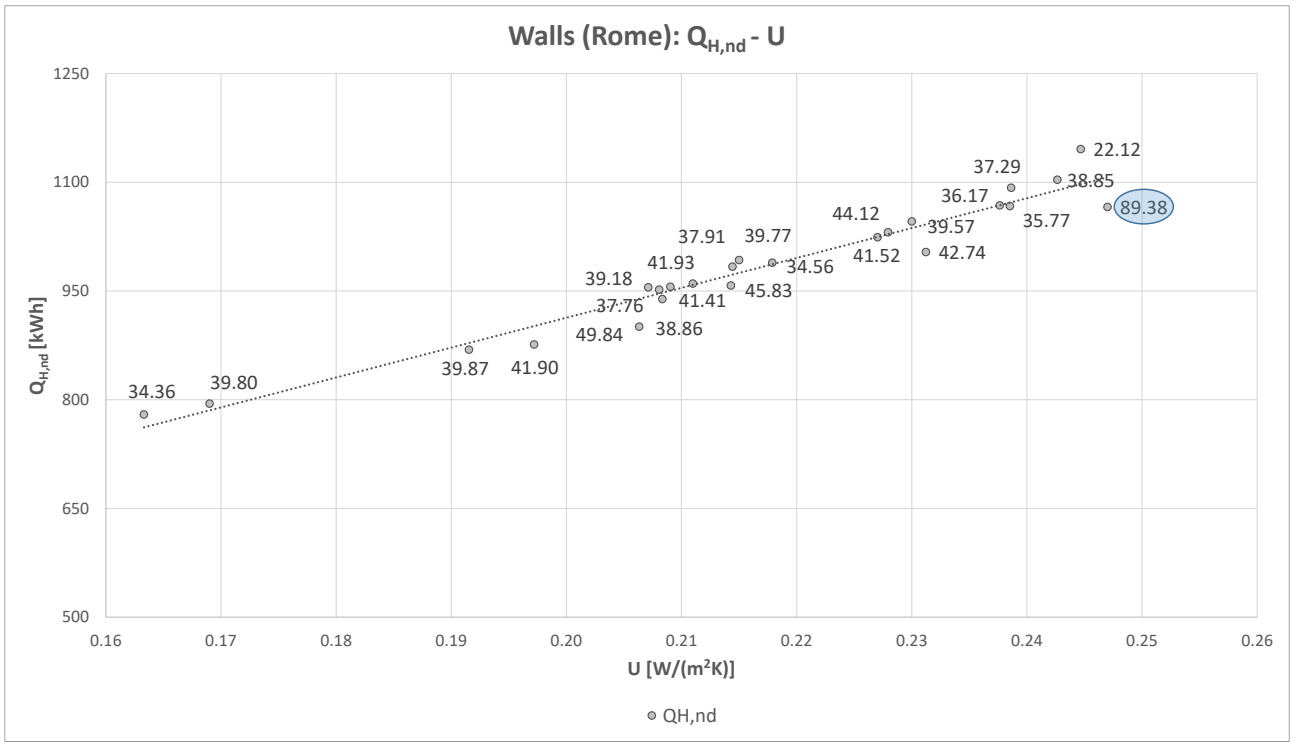

Grafico 59: Rapporto tra Fabbisogno Invernale e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Capacità Termica Interna [kJ/(m²K)]

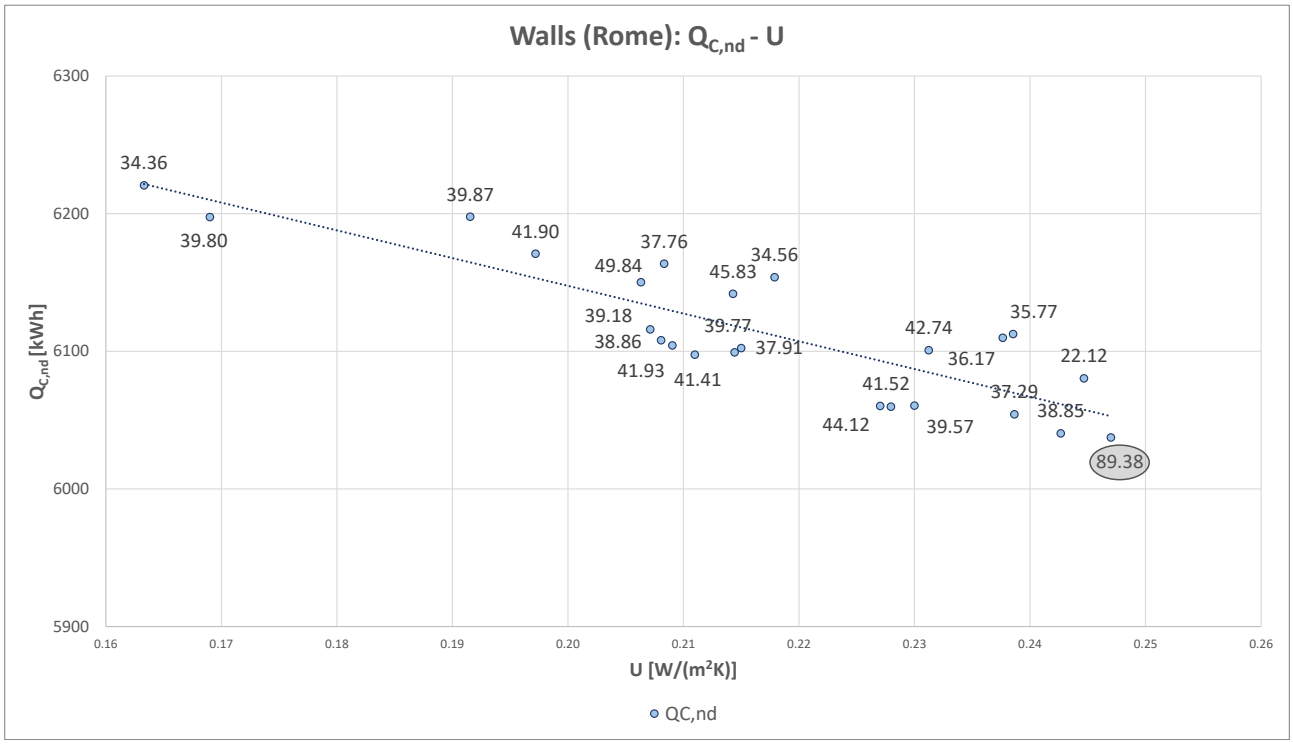

Grafico 60: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Capacità Termica Interna [kJ/(m²K)]

Nel periodo estivo invece, dove la capacità termica interna non sembra seguire un particolare andamento, il punto associato alla nuova struttura si trova più in basso rispetto a tutti gli altri punti (stesso comportamento evidenziato per la località di Milano).

Per approfondire l'incidenza della capacità termica interna areica, sia nel periodo invernale che nel periodo estivo, sono stati realizzati ulteriori grafici che comparano i fabbisogni di energia utile associati alla nuova struttura rispetto ai fabbisogni di energia utile di altre cinque strutture, caratterizzate da trasmittanza termica simile alla nuova struttura introdotta ma minore capacità termica interna areica.

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Total Internal Heat Capacity	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Attenuation f_a	Time Shift ϕ	Areal Internal Heat Capacity k_J	Heating Energy Need $Q_{H,nd}$	Cooling Energy Need $Q_{C,nd}$	$Q_{H,nd}$ Percentage Increase %	$Q_{C,nd}$ Percentage Increase %
-	-	[W/(m²K)]	[kg/m²]	[kJ/m²K]	[W/(m²K)]	[-]	[h]	[kJ/(m²K)]	[kWh]	[kWh]	[-]	[-]
7	Rome	0.239	228.86	257.10	0.007	0.031	21.10	35.77	1067.13	6112.50	0.11%	1.25%
11	Rome	0.238	265.09	313.10	0.006	0.026	22.70	36.17	1068.14	6109.88	0.21%	1.20%
13	Rome	0.243	444.15	421.10	0.002	0.010	26.95	38.85	1103.60	6040.33	3.53%	0.05%
22	Rome	0.239	308.25	356.30	0.004	0.017	24.57	37.29	1092.52	6054.21	2.49%	0.28%
23	Rome	0.245	49.63	68.90	0.154	0.631	5.87	22.12	1145.93	6080.31	7.51%	0.71%
29	Rome	0.247	617.50	618.00	0.04	0.163	12.33	89.38	1065.92	6037.33	0.00%	0.00%

Tabella 38: Caratteristiche delle Strutture Opache con Trasmittanza Termica Simile e Fabbisogni di Energia Utile

A differenza di Milano, il fabbisogno di energia utile per il riscaldamento risulta sempre maggiore nelle strutture caratterizzate da capacità termica interna minore, così come accade nel periodo estivo. Questo significa che il vantaggio che si ottiene dall'aumento di capacità termica interna risulta evidente sia nel periodo estivo che nel periodo invernale, aspetti che nei grafici precedenti non è stato possibile evidenziare.

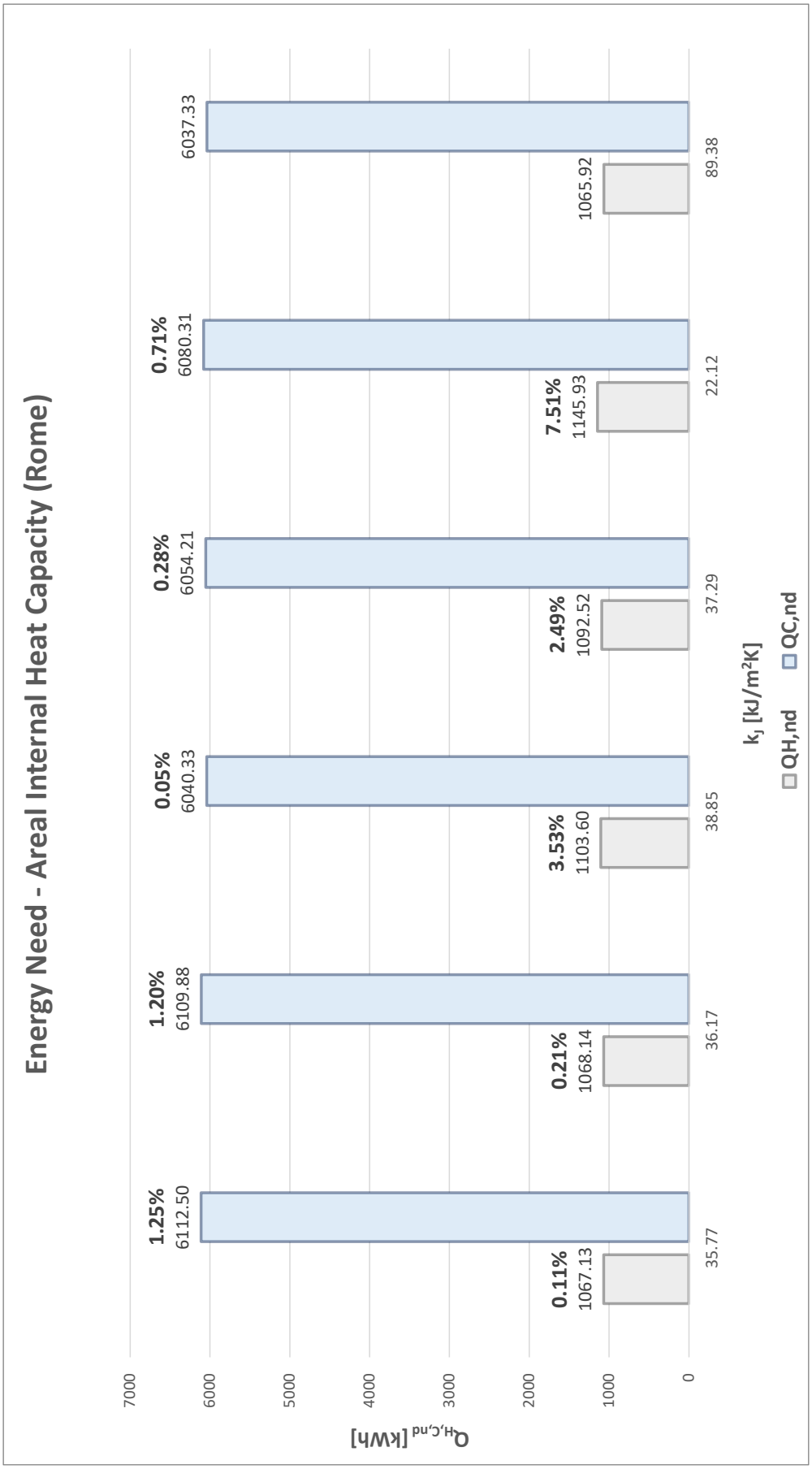

Grafico 61: Fabbisogni di Energia Utile in Funzione della Diversa Capacità Termica Interna Areica, con Variazione Percentuale Rispetto ai Fabbisogni Associati alla Struttura con Capacità Termica Interna Areica Superiore (89,38 kJ/m²K)

4.6.3 Palermo

Come per Milano e Roma, inserendo la nuova struttura nei grafici precedentemente realizzati (paragrafo 4.1.3), è possibile notare come il punto che la identifichi si trovi posizionato al di sotto degli altri punti caratterizzati da trasmittanze termiche simili e minore capacità termica interna areica, ma non è posizionato particolarmente in basso rispetto alla linea di tendenza.

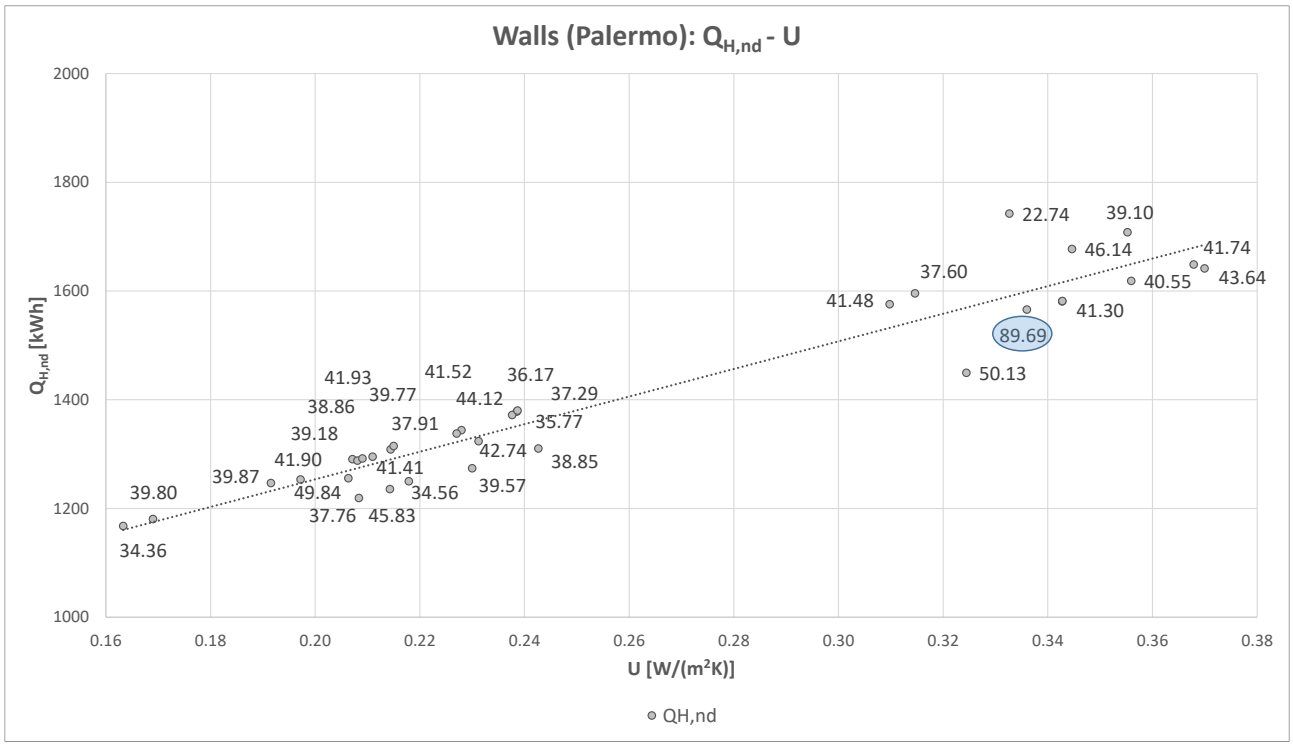

Grafico 62: Rapporto tra Fabbisogno Invernale e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Capacità Termica Interna [kJ/(m2K)]

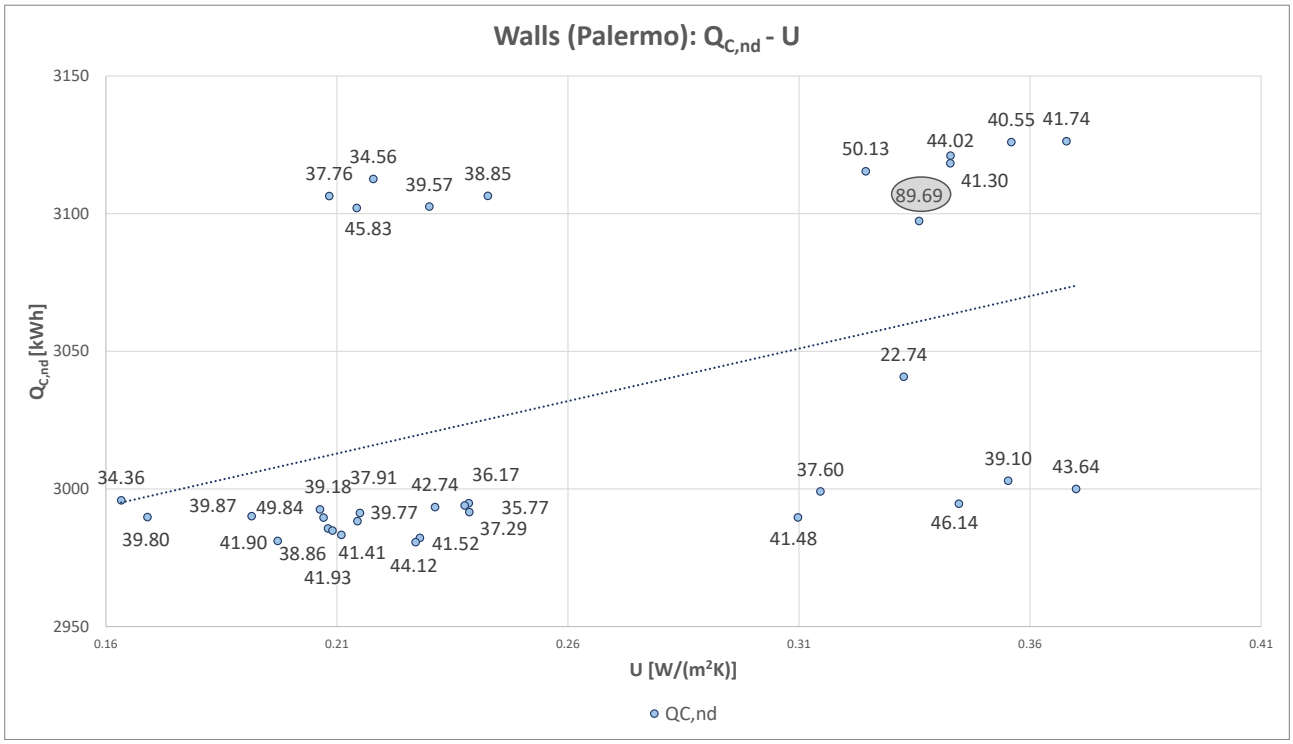

Grafico 63: Rapporto tra Fabbisogno Estivo e Trasmittanza Termica, i Numeri Identificano la Capacità Termica Interna [kJ/(m²K)]

Nel periodo estivo la capacità termica interna non sembra seguire un particolare andamento, il punto associato alla nuova struttura non ha una posizione significativa.

Per approfondire l'incidenza della capacità termica interna areica, sia nel periodo invernale che nel periodo estivo, sono stati realizzati ulteriori grafici che comparano i fabbisogni di energia utile associati alla nuova struttura rispetto ai fabbisogni di energia utile di altre cinque strutture, caratterizzate da trasmittanza termica simile alla nuova struttura introdotta ma minore capacità termica interna areica.

n	Simulated on	Thermal Transmittance U	Surface Mass	Total Internal Heat Capacity	Periodic Thermal Transmittance Y_{ie}	Attenuation f_a	Time Shift ϕ	Areal Internal Heat Capacity k_J	Heating Energy Need $Q_{H,nd}$	Cooling Energy Need $Q_{C,nd}$	$Q_{H,nd}$ Percentage Increase %	$Q_{C,nd}$ Percentage Increase %
-	-	[W/(m²K)]	[kg/m²]	[kJ/m²K]	[W/(m²K)]	[-]	[h]	[kJ/(m²K)]	[kWh]	[kWh]	[-]	[-]
5	Palermo	0.343	294.00	342.00	0.018	0.052	18.18	44.02	1581.03	3118.29	0.96%	0.68%
21	Palermo	0.343	375.06	343.30	0.011	0.033	20.35	41.30	1581.74	3121.05	1.01%	0.77%
24	Palermo	0.324	286.44	307.70	0.135	0.418	6.73	50.13	1449.74	3115.36	-7.42%	0.58%
25	Palermo	0.345	238.00	259.80	0.045	0.131	12.03	46.14	1677.28	2994.65	7.11%	-3.31%
33	Palermo	0.333	44.63	63.80	0.261	0.785	4.27	22.74	1742.44	3040.76	11.27%	-1.83%
43	Palermo	0.336	612.50	612.90	0.062	0.184	11.50	89.69	1565.98	3097.32	0.00%	0.00%

Tabella 39: Caratteristiche delle Strutture Opache con Trasmittanza Termica Simile e Fabbisogni di Energia Utile

Come per Milano, è possibile notare che il fabbisogno di energia utile per il riscaldamento non risulta sempre maggiore nelle strutture caratterizzate da capacità termica interna minore, mentre nel periodo estivo il fabbisogno di energia utile risulta sempre superiore rispetto alla struttura con capacità termica interna più elevata. Questo significa che il vantaggio che si ottiene dall'aumento di capacità termica interna risulta più evidente nel periodo estivo rispetto al periodo invernale, aspetto che nuovamente nei grafici precedenti non è stato possibile evidenziare.

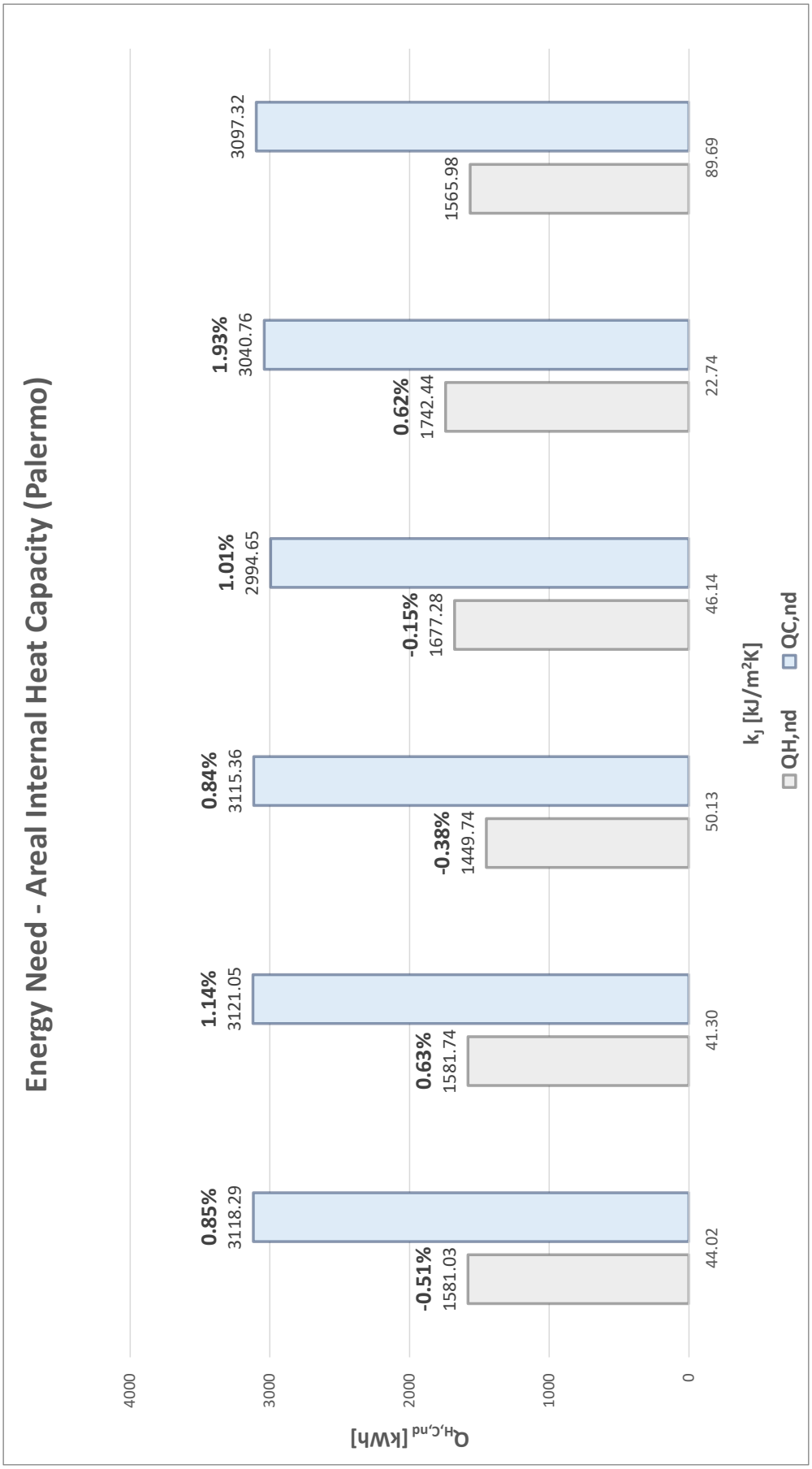

Grafico 64: Fabbisogni di Energia Utile in Funzione della Diversa Capacità Termica Interna Areica, con Variazione Percentuale Rispetto ai Fabbisogni Associati alla Struttura con Capacità Termica Interna Areica Superiore (89,69 kJ/m²K)

4.7 Analisi Statistica: Valutazione del Peso sul Fabbisogno di Energia Utile dei Parametri Termo-Fisici degli Elementi dell'Involucro Edilizio

Al fine di comprendere il peso sui fabbisogni di energia per il riscaldamento e il raffrescamento di ogni parametro utilizzato (trasmittanza termica, massa superficiale, capacità termica totale, trasmittanza termica periodica, attenuazione, sfasamento e capacità termica interna areica), vengono effettuate le seguenti valutazioni statistiche: calcolo delle matrici di correlazione e calcolo del peso per correlazione. Una correlazione è un numero compreso tra -1 e +1 che misura il grado di associazione tra due parametri. Attraverso le matrici di correlazione, definendo una soglia di correlazione adeguata, è possibile individuare se alcune coppie di parametri sono eccessivamente dipendenti tra loro. In questo caso, imponendo una soglia del 95%, si vanno ad identificare e scartare le coppie di parametri correlati sopra tale valore. Le variabili fortemente dipendenti da un'altra vengono rimosse dai parametri di studio in quanto, oltre a risultare ridondanti e di poca influenza, generano dispersioni in termini di «peso» nella previsione. Successivamente alle matrici, vengono calcolati i pesi per correlazione. Tali pesi, che vengono restituiti come valore assoluto, permettono di definire quali dei parametri utilizzati sono più influenti nel calcolo dei fabbisogni di energia invernali ed estivi. Maggiore è il peso del parametro, maggiore è la sua rilevanza. Per il caso studio 1 e 2 (villetta senza sottotetto e villetta con sottotetto isolato), vengono calcolate le matrici e i pesi di correlazione associati alle diverse zone climatiche. Per calcolare le matrici di correlazione vengono forniti in input tutti i parametri (trasmittanza termica, massa superficiale, capacità termica totale, trasmittanza termica periodica, attenuazione, sfasamento e capacità areica interna) che identificano le configurazioni di involucro edilizio utilizzate nelle singole simulazioni, mentre in output vengono assegnati i relativi fabbisogni di energia invernali ed estivi ricavati dalle medesime simulazioni.

4.7.1 Calcolo delle Matrici di Correlazione

Le matrici di correlazione risultano identiche per entrambi i casi studio, ma differenti per le diverse località considerate. Come si può osservare nelle tabelle 40,41 e 42, avendo valori sopra la soglia di correlazione precedentemente definita (evidenziati in rosso), la capacità termica totale e il fattore di attenuazione risultano essere rispettivamente dipendenti dalla massa superficiale e dalla trasmittanza termica periodica. Per questo motivo si decide di escludere dal calcolo dei pesi tali parametri (tabella 4, 5 e 6). Occorre precisare inoltre che un valore positivo per la correlazione implica un'associazione diretta mentre un valore negativo un'associazione inversa. Sulla diagonale principale si ha sempre correlazione pari a 1 in quanto ogni parametro e strettamente dipendente da sé stesso.

	1
	±0.95 ÷ ±0.99
	±0.71 ÷ ±0.94
	±0.41 ÷ ±0.7
	±0.11 ÷ ±0.4
	<0.1

Milan							
	U [W/m²k]	**M_s** [kg/m²]	**C_{tot}** [kJ/m2k]	**Y_{ie}** [W/m²k]	**fa** [-]	**ϕ** [h]	**ki** [kJ/m²k]
U [W/m²k]	1	-0.04	-0.08	0.20	0.19	-0.36	0.12
M_s [kg/m²]	-0.04	1	0.96	-0.69	-0.69	0.73	0.53
C_{tot} [kJ/m2k]	-0.08	0.96	1	-0.74	-0.74	-0.79	0.52
Y_{ie} [W/m²k]	0.20	-0.69	-0.74	1	0.99	-0.85	-0.32
fa [-]	0.19	-0.69	-0.74	0.99	1	-0.85	-0.31
ϕ [h]	-0.36	0.73	-0.79	-0.85	-0.85	1	0.03
ki [kJ/m²k]	0.12	0.53	0.52	-0.32	-0.31	0.03	1

Tabella 40: Matrice di Correlazione Milano (Caso Studio 1 e 2)

Rome							
	U [W/m^{2}k]	**M_s** [kg/m^2]	**C_{tot}** [kJ/m2k]	**Y_{ie}** [W/m^{2}k]	**fa** [-]	**ϕ** [h]	**ki** [kJ/m^{2}k]
U [W/m^{2}k]	1	-0.19	-0.27	0.30	0.28	-0.37	-0.22
M_s [kg/m^2]	-0.19	1	0.95	-0.67	-0.65	0.72	0.51
C_{tot} [kJ/m2k]	-0.27	0.95	1	-0.72	-0.71	0.78	0.52
Y_{ie} [W/m^{2}k]	0.30	-0.67	-0.72	1	1.00	-0.82	-0.37
fa [-]	0.28	-0.65	-0.71	1.00	1	-0.84	-0.31
ϕ [h]	-0.37	0.72	0.78	-0.82	-0.84	1	0.03
ki [kJ/m^{2}k]	-0.22	0.51	0.52	-0.37	-0.31	0.03	1

Tabella 41: Matrice di Correlazione Roma (Caso Studio 1 e 2)

Palermo							
	U [W/m^{2}k]	**M_s** [kg/m^2]	**C_{tot}** [kJ/m2k]	**Y_{ie}** [W/m^{2}k]	**fa** [-]	**ϕ** [h]	**ki** [kJ/m^{2}k]
U [W/m^{2}k]	1	-0.27	-0.33	0.43	0.36	-0.55	0.09
M_s [kg/m^2]	-0.27	1	0.95	-0.62	-0.61	0.68	0.37
C_{tot} [kJ/m2k]	-0.33	0.95	1	-0.67	-0.66	0.74	0.36
Y_{ie} [W/m^{2}k]	0.43	-0.62	-0.67	1	0.99	-0.78	-0.20
fa [-]	0.36	-0.61	-0.66	0.99	1	-0.81	-0.13
ϕ [h]	-0.55	0.68	0.74	-0.78	-0.81	1	-0.20
ki [kJ/m^{2}k]	0.09	0.37	0.36	-0.20	-0.13	-0.20	1

Tabella 42: Matrice di Correlazione Palermo (Caso Studio 1 e 2)

Dalle tabelle 43, 44, e 45 si può osservare, indipendentemente dal segno, che:

La dipendenza della trasmittanza termica con la massa superficiale, la trasmittanza termica periodica e lo sfasamento aumenta passando dalla zona climatica E (Milano) alla zona climatica B (Palermo) mentre la dipendenza trasmittanza termica-capacità termica interna areica sembra non seguire nessuna regola.

La dipendenza della massa superficiale con la trasmittanza termica periodica, lo sfasamento e la capacità termica interna areica diminuisce passando dalla zona climatica E (Milano) alla zona climatica B (Palermo).

La dipendenza della trasmittanza termica periodica con lo sfasamento e la capacità termica interna areica diminuisce passando dalla zona climatica E (Milano) alla zona climatica B (Palermo).

La dipendenza dello sfasamento con la capacità termica interna areica rimane costante per Milano e Roma mentre aumenta per Palermo.

Milan					
	U [W/m²k]	**M_s** [kg/m²]	**Y_{ie}** [W/m²k]	**ϕ** [h]	**ki** [kJ/m²k]
U [W/m²k]	1	-0.04	0.20	-0.36	0.12
M_s [kg/m²]	-0.04	1	-0.69	0.73	0.53
Y_{ie} [W/m²k]	0.20	-0.69	1	-0.85	-0.32
ϕ [h]	-0.36	0.73	-0.85	1	0.03
ki [kJ/m²k]	0.12	0.53	-0.32	0.03	1

Tabella 43: Matrice di Correlazione Ridotta Milano (Caso Studio 1 e 2)

Rome					
	U [W/m²k]	**M_s** [kg/m²]	**Y_{ie}** [W/m²k]	**ϕ** [h]	**ki** [kJ/m²k]
U [W/m²k]	1	-0.19	0.30	-0.37	-0.22
M_s [kg/m²]	-0.19	1	-0.67	0.72	0.51
Y_{ie} [W/m²k]	0.30	-0.67	1	-0.82	-0.37
ϕ [h]	-0.37	0.72	-0.82	1	0.03
ki [kJ/m²k]	-0.22	0.51	-0.37	0.03	1

Tabella 44: Matrice di Correlazione Ridotta Roma (Caso Studio 1 e 2)

Palermo					
	U [W/m²k]	**M_s** [kg/m²]	**Y_{ie}** [W/m²k]	**ϕ** [h]	**ki** [kJ/m²k]
U [W/m²k]	1	-0.27	0.43	-0.55	0.09
M_s [kg/m²]	-0.27	1	-0.62	0.68	0.37
Y_{ie} [W/m²k]	0.43	-0.62	1	-0.78	-0.20
ϕ [h]	-0.55	0.68	-0.78	1	-0.20
ki [kJ/m²k]	0.09	0.37	-0.20	-0.20	1

Tabella 45: Matrice di Correlazione Ridotta Palermo (Caso Studio 1 e 2)

Osservando invece i segni dei valori all'interno delle matrici di correlazione (tabelle 43, 44 e 45), è possibile notare che questi si mantengono costanti per tutte le località dei casi studio tranne nella relazione:

Trasmittanza termica - capacità termica interna areica, dove per Milano e per Palermo si ha una correlazione diretta, mentre per Roma si ha una correlazione inversa.

Sfasamento - capacità termica interna areica, dove per Milano e per Roma si ha una correlazione diretta, mentre per Palermo si ha una correlazione inversa.

4.7.1 Calcolo del Peso per Correlazione

Utilizzando le sole variabili definite indipendenti dalla soglia di correlazione imposta al 95%, si individuano i pesi che i singoli parametri hanno nel calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e per il raffrescamento, sia per il caso studio 1 che per il caso studio 2.

Osservando le tabelle 46 e 47, sono evidenziati in verde i parametri con peso più influente, in giallo i parametri con peso intermedio e in rosso i pesi dei parametri che sembrano non influire in maniera significativa sul calcolo dei fabbisogni.

Da tale analisi statistica, si può dedurre che nella maggior parte dei casi la trasmittanza termica è il parametro più influenza i fabbisogni di energia, mentre lo sfasamento e la capacità termica interna areica risultano essere quelli meno influenti sia nel calcolo del fabbisogno invernale che in quello estivo.

I risultati riportati nella tabella 46 confermano i risultati studiati nel paragrafo 4.6, dove è stata approfondita l'incidenza della capacità termica interna areica per ogni località nel caso studio 1, introducendo nell'analisi una parete altamente massiva. Dalle analisi era risultato che per la località Milano un aumento di capacità termica interna nel periodo invernale non implicava necessariamente una diminuzione del fabbisogno (nella tabella 46 infatti la capacità termica interna risulta avere il peso più basso), mentre nel periodo estivo un aumento di capacità termica comportava sempre una diminuzione del fabbisogno di energia (la capacità termica interna assume un peso molto più rilevane nel periodo estivo rispetto a quello invernale). Nella località di Roma invece, un aumento di capacità termica interna corrisponde ad una diminuzione del fabbisogno sia invernale che estivo, ma le percentuali di variazione più significative si sono riscontrate nel periodo invernale, dove appunto secondo la tabella 46 la capacità termica interna assume un peso maggiore rispetto al periodo estivo. Infine, nella località di Palermo, l'introduzione di una parete molto massiva non ha generato una particolare variazione del fabbisogno di energia sia nel periodo invernale che nel periodo estivo, di fatti nella tabella 46 in entrambi i periodi la capacità termica interna riveste un peso non significativo.

Case Study 1						
	$Q_{H,nd}$			$Q_{C,nd}$		
	Milan	Rome	Palermo	Milan	Rome	Palermo
U [W/m^{2}k]	0.975	0.979	0.960	0.804	0.845	0.404
M$_s$ [kg/m^2]	0.275	0.301	0.523	0.131	0.082	0.195
Y$_{ie}$ [W/m^{2}k]	0.136	0.306	0.474	0.339	0.097	0.101
ϕ [h]	0.079	0.218	0.363	0.403	0.176	0.040
ki [kJ/m^{2}k]	0.015	0.358	0.071	0.322	0.051	0.062

Tabella 46: Pesi per Correlazione Tra i Fabbisogni di Energia e i Parametri Studiati (Caso Studio 1)

Case Study 2						
	$Q_{H,nd}$			$Q_{C,nd}$		
	Milan	Rome	Palermo	Milan	Rome	Palermo
U [W/m^{2}k]	0.973	0.972	0.963	0.869	0.862	0.163
M$_s$ [kg/m^2]	0.276	0.235	0.483	0.131	0.109	0.229
Y$_{ie}$ [W/m^{2}k]	0.132	0.197	0.389	0.234	0.126	0.347
ϕ [h]	0.084	0.165	0.273	0.303	0.051	0.347
ki [kJ/m^{2}k]	0.018	0.302	0.011	0.022	0.143	0.195

Tabella 47: Pesi per Correlazione Tra i Fabbisogni di Energia e i Parametri Studiati (Caso Studio 2)

Osservando i grafici del fabbisogno di riscaldamento (figura 4, grafico “a” e “c”) si evince che:

La trasmittanza termica risulta essere influente in egual misura per tutte e tre le zone climatiche.

La massa superficiale risulta essere maggiormente influente a Palermo rispetto a Milano e Roma.

La trasmittanza termica periodica e lo sfasamento risultano avere una rilevanza crescente spostandosi da zone climatiche più fredde (Milano) verso zone climatiche più calde (Palermo). Tale comportamento risulta essere concorde ai risultati riportati nelle tabelle 43, 44, e 45 dove si può notare la forte correlazione tra Y_{ie} e φ, pari a 0.85, 0.82 e 0.78 rispettivamente per Milano, Roma e Palermo.

La capacità termica interna risulta essere poco significativa per le città di Milano e Palermo, mentre risulta essere il secondo parametro più importante dopo la trasmittanza per Roma. Questa netta differenza dei pesi per le diverse città potrebbe essere imputata all’elevata irradianza solare presente a Roma (tabella 48), in special modo quella globale orizzontale e quelle su piano verticale orientate a sud e a est.

Osservando invece i grafici del fabbisogno di raffrescamento (figura 4, grafico “b” e “d”) si evince che:

La trasmittanza risulta essere di nuovo il parametro più influente tranne che per la città di Palermo. Occorre osservare che rispetto alla previsione per il fabbisogno di riscaldamento, nel fabbisogno di raffrescamento il peso di tale parametro diminuisce in media del 22% (escludendo il peso della trasmittanza del caso d) per Palermo).

La massa superficiale risulta essere maggiormente influente a Palermo rispetto a Milano e Roma. Anche in questo caso, il peso della massa superficiale diminuisce mediamente del 32% per il fabbisogno di raffrescamento rispetto a quello di riscaldamento (casi “a” e “c”).

La trasmittanza termica periodica e lo sfasamento risultano avere un comportamento diverso per il caso studio 1 (b) e per il caso studio 2 (d). Nel caso studio 1, sia la trasmittanza termica periodica che lo sfasamento sembrano decrescere verso le zone climatiche più calde, mentre nel caso studio 2 sembrano maggiormente influenti per Milano e Palermo, rispetto che a Roma. Rispettivamente per il caso studio 1 e il caso studio 2, gli andamenti di trasmittanza termica periodica e sfasamento risultano simili data la forte correlazione tra queste due variabili mostrata nelle tabelle 43, 44, e 45.

La capacità termica interna risulta avere un comportamento variabile nei due casi studio.

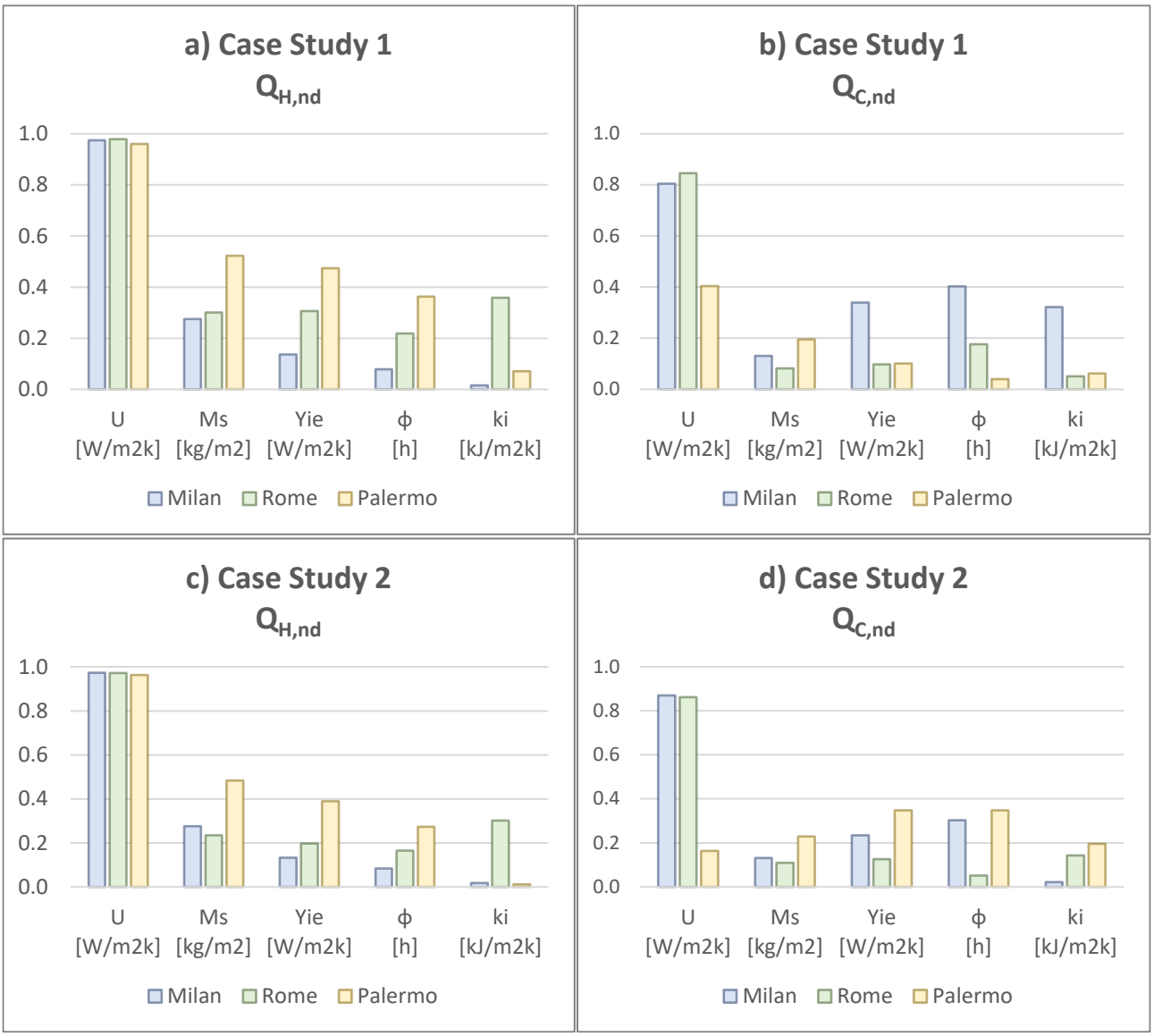

Figura 4: Rappresentazione dei Pesi in Funzione del Caso Studio, del Fabbisogno di Riscaldamento e Raffrescamento e della Località

	T_{avg} [°C]	$I_{gH,tot}$ [W/m²]	$I_{S,tot}$ [W/m²]	$I_{E,tot}$ [W/m²]	$I_{N,tot}$ [W/m²]	$I_{O,tot}$ [W/m²]
Milan	14.3	1316	961	595	439	884
Rome	16.7	1584	1122	1231	495	661
Palermo	19.0	1586	1063	1104	501	662

Tabella 48: Dati Climatici delle Località Considerate

4.7.3 Conclusioni

Dal calcolo dei fabbisogni con il metodo dinamico orario riportato nella UNI EN ISO 5201-1 e dall'analisi statistica effettuata, si evince che la trasmittanza termica risulta essere il parametro più influente, precisando però che il suo peso diminuisce di circa il 22% nella stima del fabbisogno estivo rispetto a quello invernale.

Altro aspetto fondamentale è che la trasmittanza termica, la massa superficiale, la trasmittanza termica periodica, lo sfasamento e la capacità areica termica interna sembrano seguire un pattern solo nel calcolo dei fabbisogni invernali (sia per il caso studio 1 che per il 2), mentre nel calcolo dei fabbisogni di raffrescamento si risconta una corrispondenza tra i due casi studio, in termini di pesi, solo per la Trasmittanza termica e la Massa superficiale. Il fatto che l'andamento di quest'ultimo parametro rimanga costante tra i due casi studio può essere significativo in quanto direttamente proporzionale con la capacità termica, variabile fondamentale nel controllo di un edificio in regime estivo.

In generale, la capacità termica areica interna invece risulta essere il parametro meno stabile ed influente sia nel calcolo estivo che invernale.

4.8 Valutazione del Benessere Termico in Funzione della Tipologia di Struttura Mediante il Modello di Comfort Adattivo

Nei paragrafi precedenti le analisi inerenti al metodo dinamico riportato nella norma UNI EN ISO 52016 riguardavano esclusivamente l'andamento dei fabbisogni di energia utile. L'obiettivo di questa ulteriore analisi sarà invece valutare le condizioni di benessere termico in assenza di un impianto di climatizzazione estiva secondo il modello di comfort adattivo definito dalla norma UNI EN 16798-1:2019. L'analisi è trattata per il caso studio 2 e il caso studio 3, andando a variare la tipologia di struttura (da massiva a leggera). Gli ambienti che si andranno a studiare saranno il bagno 2 e la camera matrimoniale. Sono stati scelti ambienti appartenenti al piano primo poiché, oltre a valutare il comfort in funzione della diversa tipologia di struttura, lo si vuole valutare anche in funzione della tipologia di solaio di sottotetto, per questo si vanno a considerare entrambi i casi studio. Inoltre, la scelta di questi due ambienti è stata influenzata dal loro diverso orientamento: il bagno 2 è esposto a Nord-Est con finestra posizionata ad Est, mentre la camera matrimoniale è esposta a Sud- Ovest con una finestra posizionata a Sud e un'altra ad Ovest.

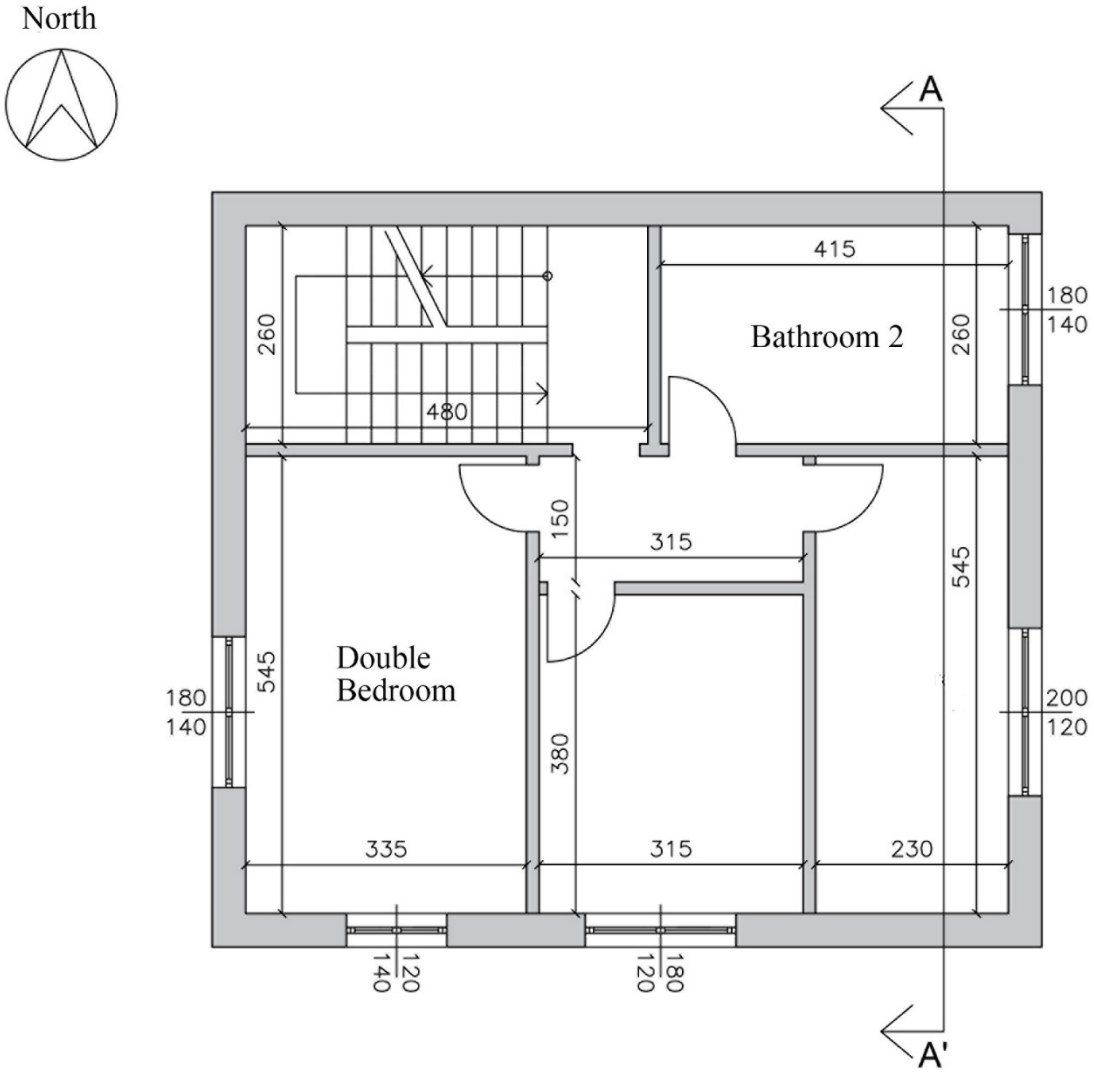

Figura 5: Planimetrica Piano Primo con Evidenziati gli Ambienti Oggetto di Studio

Il modello del comfort adattivo si basa sull'assunto che l'occupante di un ambiente non climatizzato tenda ad adattarsi operando liberamente sul controllo del microclima in base alle proprie abitudini. Tale modello definisce la temperatura di comfort, ovvero la temperatura accettabile interna, in relazione all'andamento storico delle condizioni climatiche esterne, in quanto non si limita al valore di temperatura esterna di un solo

specifico giorno ma considera anche i valori di temperatura esterna passati. L'andamento storico delle temperature esterne viene tenuto in considerazione attraverso la temperatura media di running (θ_{rm}). L'algoritmo di calcolo della temperatura di comfort, mettendo in relazione la temperatura interna operativa di un ambiente non climatizzato con la temperatura di running, consente di definire tre categorie di comfort basate sulla sensazione di accettabilità da parte dell'utenza. È possibile individuare le ore di comfort associate ad un ambiente in un certo periodo di tempo attraverso la rappresentazione grafica che prevede la sovrapposizione delle temperature operative (θ_{op}) simulate in regime dinamico orario alle categorie di comfort appena definite. I campioni orari, rappresentati come punti nel grafico, se compresi in una determinata categoria di comfort, individuate nel grafico da delle fasce, significano ore di benessere termico, mentre i campioni al di fuori della fascia più esterna rappresentano ore di discomfort. Di seguito viene riportato un esempio di rappresentazione grafica delle ore di comfort: le linee rosse identificano i limiti della fascia associata alla categoria III, le linee gialle identificano i limiti della fascia associata alla categoria di comfort II mentre le linee blu identificano i limiti della fascia associata alla categoria di comfort I. Come è possibile notare la categoria I è la più stringente ed è quella che assicura una migliore qualità di comfort.

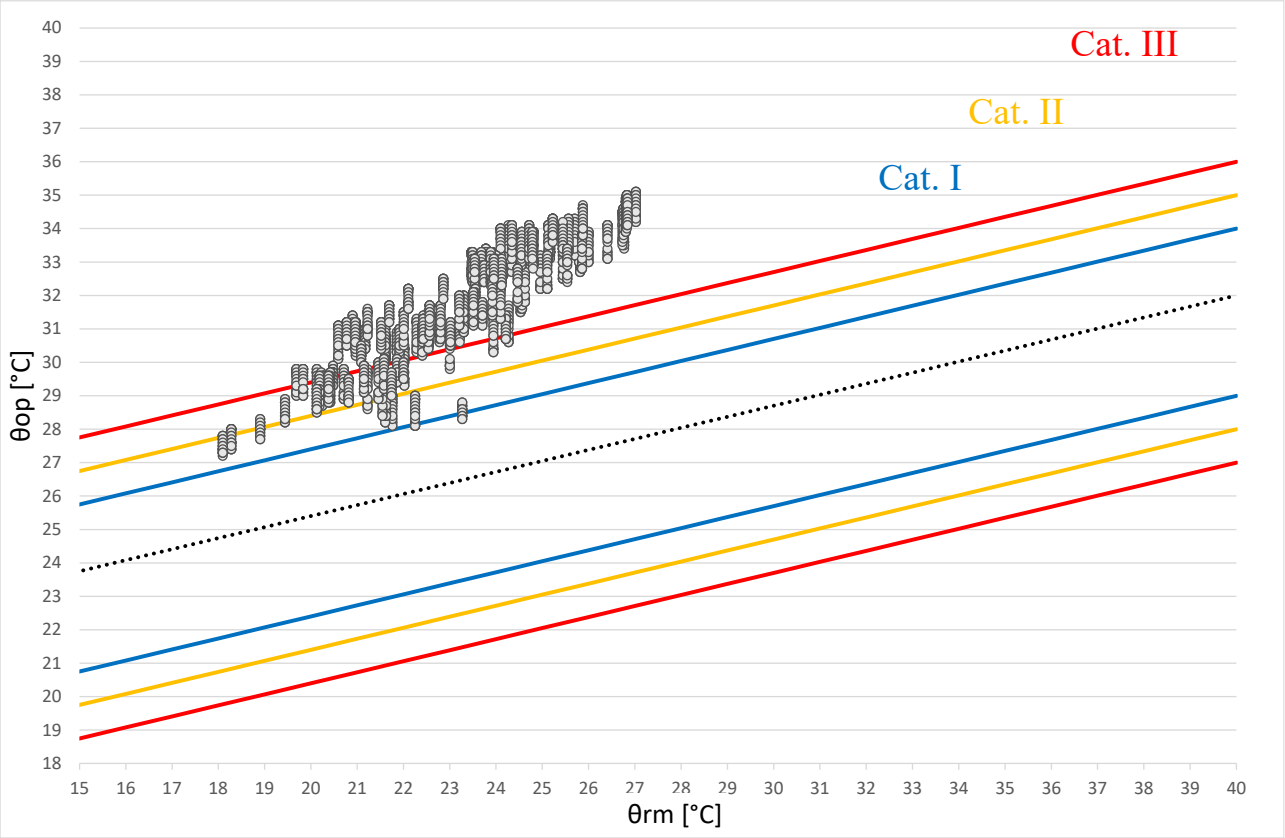

Grafico 65: Esempio di Rappresentazione Grafica delle Ore di Comfort, Ogni Punto Individua una Certa Temperatura Interna Operativa dell'Ambiente

Per ogni località climatica le simulazioni sono state realizzate in free-floating, le analisi seguenti sono state effettuate per il solo periodo estivo confrontando le ore di comfort adattivo in categoria III (cioè la fascia più esterna che va a considerare anche le ore di comfort associate alle altre due categorie), riferite al periodo 1 giugno - 30 settembre.

Di seguito la tabella 49 riporta i dati climatici caratterizzanti le varie località, in particolare si evidenziano i valori mensili riferiti alla temperatura media esterna, all'irradiazione su piano orizzontale, alle irradiazioni in funzione dei diversi orientamenti e all'irradiazione diffusa, associati al periodo 1 giugno – 30 settembre.

Climate Data											
Milan											
Month	$T_{e,avg}$	I_H	I_S	I_{S-E}	I_E	I_{N-E}	I_N	I_{N-W}	I_W	I_{S-O}	I_D
	[°C]	[kWh/m^2]									
June	22,8	190,1	86,5	107,7	122,3	105,2	83,0	105,2	122,3	107,7	81,3
July	24,5	200,6	93,0	116,9	130,9	108,7	81,4	108,7	130,9	116,9	75,9
August	24,3	164,0	94,2	110,3	110,9	84,2	57,4	84,2	110,9	110,3	64,2
September	19,8	126,0	102,6	105,1	90,4	58,8	37,1	58,8	90,4	105,1	48,1
Rome											
Month	$T_{e,avg}$	I_H	I_S	I_{S-E}	I_E	I_{N-E}	I_N	I_{N-W}	I_W	I_{S-O}	I_D
	[°C]	[kWh/m^2]									
June	22,5	212,9	87,1	115,3	135,1	115,6	87,6	115,6	135,1	115,3	78,4
July	26,3	238,8	98,7	132,8	153,6	126,6	89,9	126,6	153,6	132,8	74,2
August	26,5	197,8	104,7	127,7	131,4	99,1	64,3	99,1	131,4	127,7	67,4
September	21,6	142,6	106,8	111,6	98,8	66,2	42,6	66,2	98,8	111,6	55,7
Palermo											
Month	$T_{e,avg}$	I_H	I_S	I_{S-E}	I_E	I_{N-E}	I_N	I_{N-W}	I_W	I_{S-O}	I_D
	[°C]	[kWh/m^2]									
June	23,9	201,2	75,3	104,4	125,4	108,6	81,3	108,6	125,4	104,4	71,9
July	26,9	212,2	84,0	113,9	133,0	113,2	83,1	113,2	133,0	113,9	78,4
August	27,0	184,7	93,6	112,9	118,1	95,5	68,9	95,5	118,1	112,9	85,3
September	23,9	135,8	89,3	93,6	87,8	69,5	55,2	69,5	87,8	93,6	82,7

Tabella 49: Dati Climatici Mensili Riferiti alle Diverse Località

È possibile notare come i valori delle irradiazioni a Roma siano molto superiori rispetto ai valori determinati per le località di Milano e Palermo, questo significa che probabilmente le ore di comfort risulteranno essere minori nella località di Roma rispetto alle località di Milano e Palermo. Le colonne evidenziate riguardano le irradiazioni associate agli orientamenti delle finestre: il bagno 2 ha una sola finestra esposta ad Est, mentre la camera matrimoniale ha due finestre, una esposta a Sud e un'altra esposta ad Ovest. È possibile osservare come l'irradiazione sud risulti superiore a Milano rispetto che a Palermo, mentre le irradiazioni est ed ovest risultano superiori a Palermo rispetto che a Milano. Si andranno ora ad analizzare per ogni ambiente e ogni località gli apporti solari interni, associati al periodo 1 giugno – 30 settembre, dovuti alla presenza delle finestre, così da poter ottenere maggiori informazioni al fine della comprensione dei risultati.

Solar Gain (Windows) [kW]			
Room	Milan	Rome	Palermo
Bathroom 2	166.05	669.24	253.00
Double Bedroom	364.11	653.24	278.02

Tabella 50: Carichi Solari su Superfici Trasparenti per Ogni Ambiente in Funzione della Località Climatica

Come era possibile aspettarsi, la località di Roma presenta gli apporti solari più elevati. Per il bagno 2 gli apporti solari maggiori sono associati alla località di Palermo, mentre per la camera matrimoniale gli apporti solari maggiori sono associati alla località di Milano, inoltre è possibile notare come in entrambe le località il bagno 2 sia l'ambiente con i minori apporti solari. Per la località di Palermo però la differenza di apporti solari tra bagno 2 e camera matrimoniale non risulta elevata, mentre per la località di Milano è molto più significativa (la camera matrimoniale ha circa il doppio degli apporti solari rispetto al bagno 2). Questo significa che è più probabile aspettarsi un maggior numero di ore di comfort nel bagno 2 rispetto alla camera matrimoniale nella località di Milano piuttosto che a Palermo, poiché quest'ultimo caso è caratterizzato da apporti solari molto simili tra i due ambienti. Queste osservazioni non possono però essere confermate a priori poiché non si stanno considerando le caratteristiche dell'involucro che variano da una località all'altra,

hanno il solo scopo di evidenziare i dati climatici e le conseguenze che essi comportano sugli apporti solari interni.

4.8.1 Milano

Come già anticipato, le analisi saranno effettuate per entrambi i casi studio, con riferimento al bagno 2 e alla camera matrimoniale, andando a variare la tipologia di struttura. Lo scopo sarà determinare in quale condizione è garantito il maggior numero di ore di comfort totali.

Case Study 2				
Room	Massive Structure		Lightweight Structure	
	Comfort [h]	Discomfort [h]	Comfort [h]	Discomfort [h]
Bathroom 2	617/2928	2311/2928	922/2928	2006/2928
Double Bedroom	181/2928	2747/2928	583/2928	2345/2928

Tabella 51: Caso Studio 2, Ore di Comfort e Discomfort Totali Associate alla Tipologia di Struttura e all'Ambiente Considerato (Milano)

Case Study 3				
Room	Massive Structure		Lightweight Structure	
	Comfort [h]	Discomfort [h]	Comfort [h]	Discomfort [h]
Bathroom 2	1167/2928	1761/2928	1242/2928	1686/2928
Double Bedroom	669/2928	2259/2928	939/2928	1989/2928

Tabella 52: Caso Studio 2, Ore di Comfort e Discomfort Totali Associate alla Tipologia di Struttura e all'Ambiente Considerato (Milano)

Osservando i grafici riportati di seguito è possibile effettuare le seguenti osservazioni:

- In entrambi i casi studio e per entrambe le tipologie di strutture, l'ambiente con maggiori ore di comfort è il bagno 2, l'ipotesi iniziale per la località di Milano è stata confermata. La differenza di ore di comfort tra un ambiente e l'altro è molto più evidente nel caso studio 2 rispetto al caso studio 3.
- Per ogni ambiente e in entrambi i casi studio, la struttura leggera garantisce un maggior numero di ore di comfort.
- Tra il caso studio 2 e il caso studio 3, per ogni ambiente e ogni tipologia di struttura, viene garantito un numero superiore di ore di comfort nel caso studio 3, ovvero nel caso in cui si ha un solaio di sottotetto non isolato e una copertura isolata.

Evidenziando i seguenti aspetti si può affermare che l'ambiente che garantisce un maggior numero di ore di comfort è il bagno 2 del caso studio 3 associato alla struttura leggera. Riprendendo le analisi inerenti ai soli fabbisogni di energia utile (paragrafo 4.5), si era evidenziato come il miglior comportamento estivo, ovvero i casi che garantivano un minor fabbisogno di energia, era associato alla struttura leggera (a parità di caso studio) e all'edificio dotato di solaio di sottotetto non isolato (a parità di tipologia di struttura). Essendo l'analisi del comfort estesa al solo periodo estivo, possiamo notare come i risultati appena ricavati siano in linea con quanto riportato per i fabbisogni di energia. Si ricordi inoltre che la variazione percentuale dei fabbisogni di energia totali tra caso studio 2 e caso studio 3, mantenendo fissa la tipologia di struttura, non risultava essere particolarmente significativa, come anche la variazione associata ai fabbisogni di energia totali tra struttura massiva e struttura leggera. Questo necessitava di un'ulteriore analisi riguardo il benessere termico all'interno degli ambienti, in modo tale da poter stabilire quale sia la struttura e il caso studio che garantiscono un miglior comfort interno, ed è proprio ciò che è stato appena svolto.

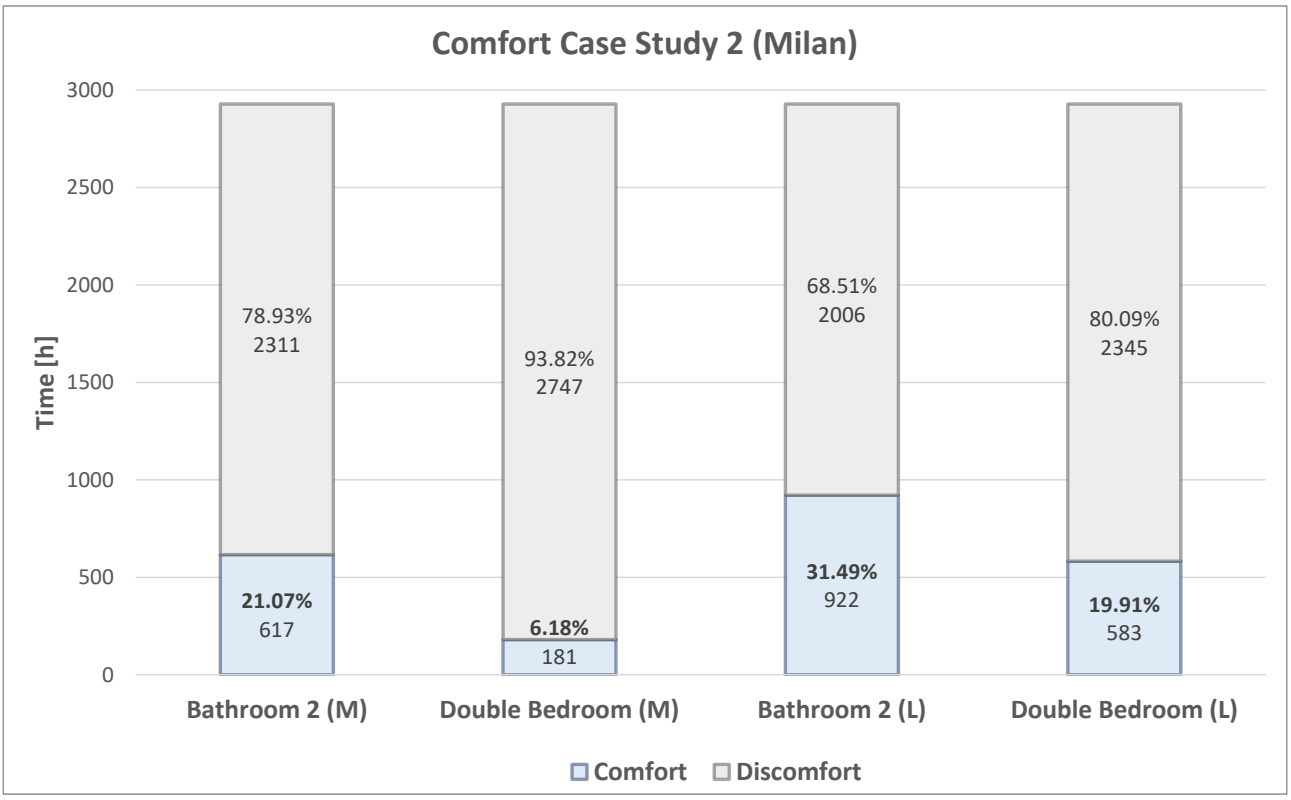

Grafico 66: Ore di Comfort e Discomfort in Funzione dell'Ambiente e della Tipologia di Struttura (Caso Studio 2)

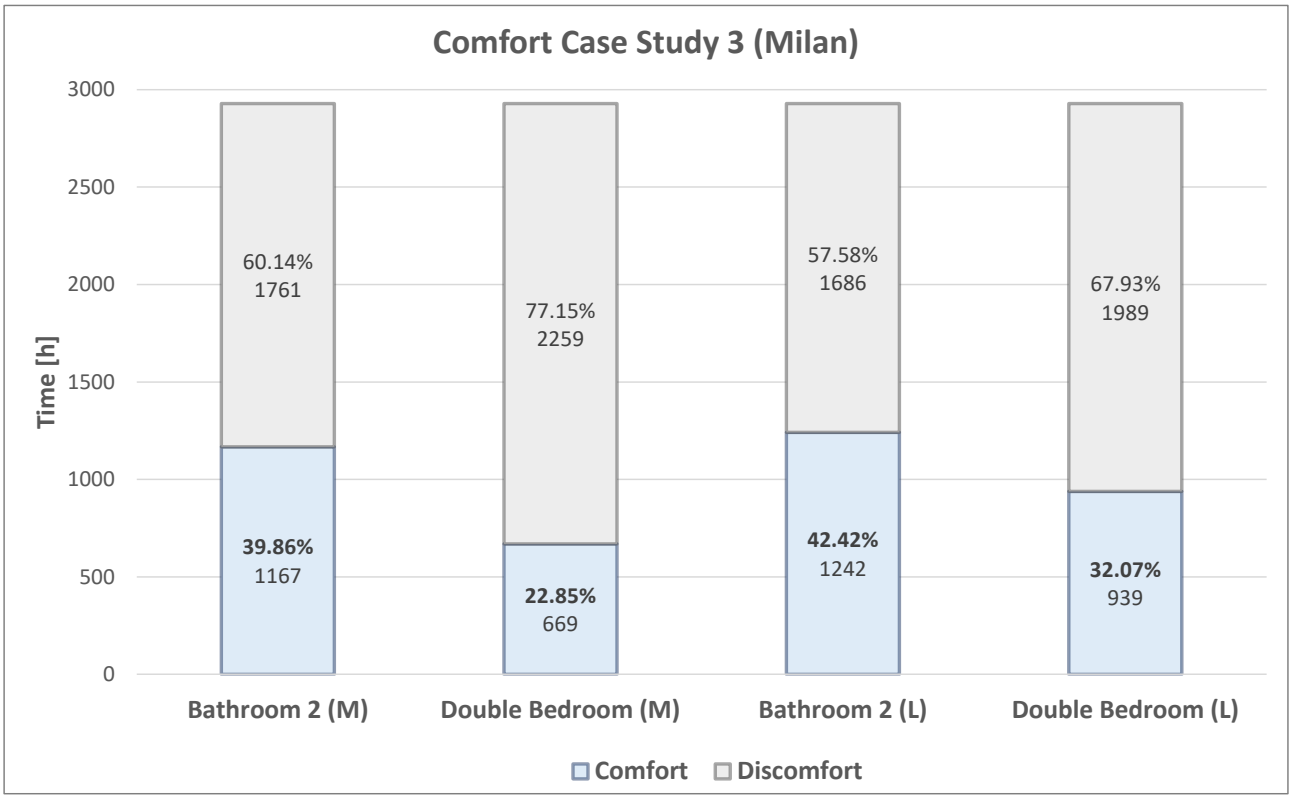

Grafico 67: Ore di Comfort e Discomfort in Funzione dell'Ambiente e della Tipologia di Struttura (Caso Studio 3)

4.8.2 Roma

Case Study 2				
Room	Massive Structure		Lightweight Structure	
	Comfort [h]	Discomfort [h]	Comfort [h]	Discomfort [h]
Bathroom 2	0/2928	2928/2928	4/2928	2924/2928
Double Bedroom	0/2928	2928/2928	2/2928	2926/2928

Tabella 53: Caso Studio 2, Ore di Comfort e Discomfort Totali Associate alla Tipologia di Struttura e all'Ambiente Considerato (Roma)

Case Study 3				
Room	Massive Structure		Lightweight Structure	
	Comfort [h]	Discomfort [h]	Comfort [h]	Discomfort [h]
Bathroom 2	0/2928	2928/2928	14/2928	2914/2928
Double Bedroom	0/2928	2928/2928	16/2928	2912/2928

Tabella 54: Caso Studio 2, Ore di Comfort e Discomfort Totali Associate alla Tipologia di Struttura e all'Ambiente Considerato (Roma)

Osservando i grafici riportati di seguito è possibile notare come in nessun caso studio, in nessun ambiente e per nessuna tipologia di struttura si abbia un numero di ore di comfort significativo. Questo come già anticipato è dovuto ai dati climatici, in particolare agli elevati apporti solari che risultato essere molto più severi rispetto agli apporti solari associati alle località di Milano e Palermo.

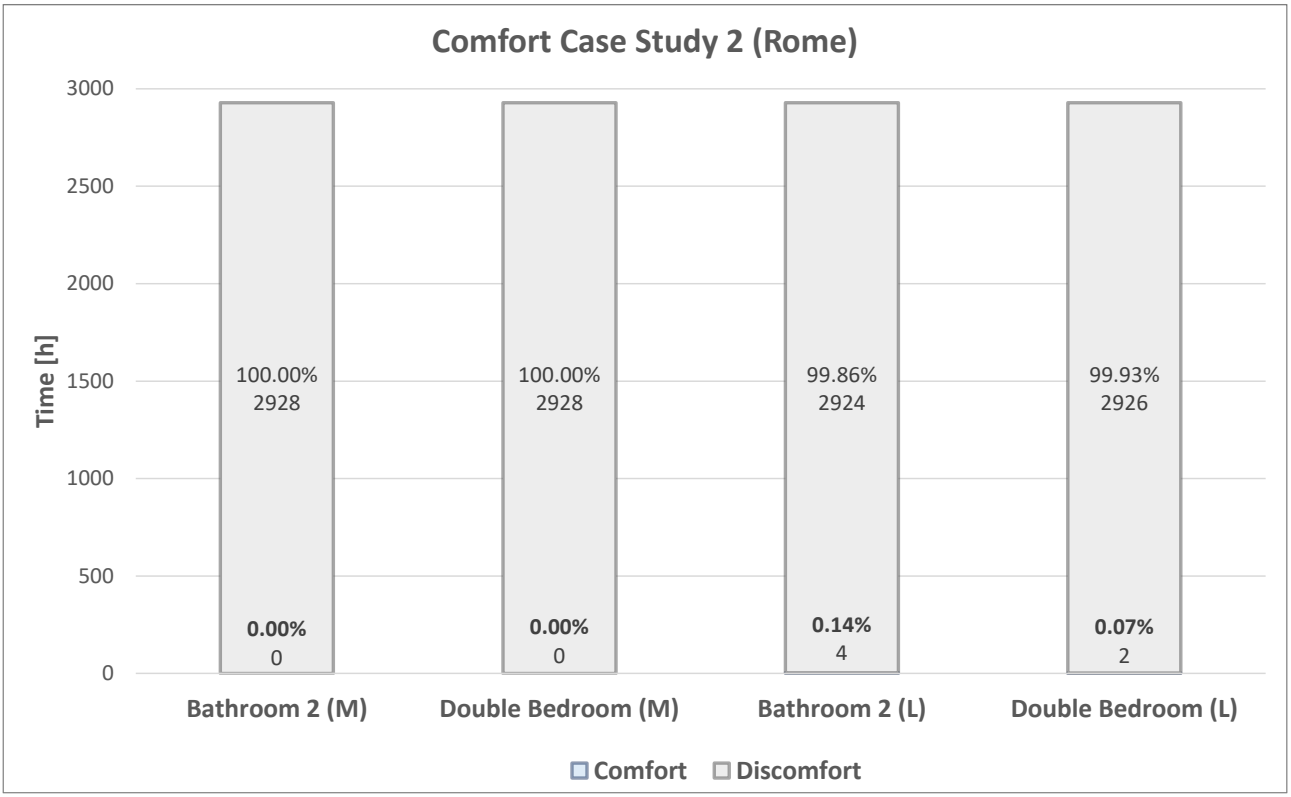

Grafico 68: Ore di Comfort e Discomfort in Funzione dell'Ambiente e della Tipologia di Struttura (Caso Studio 2)

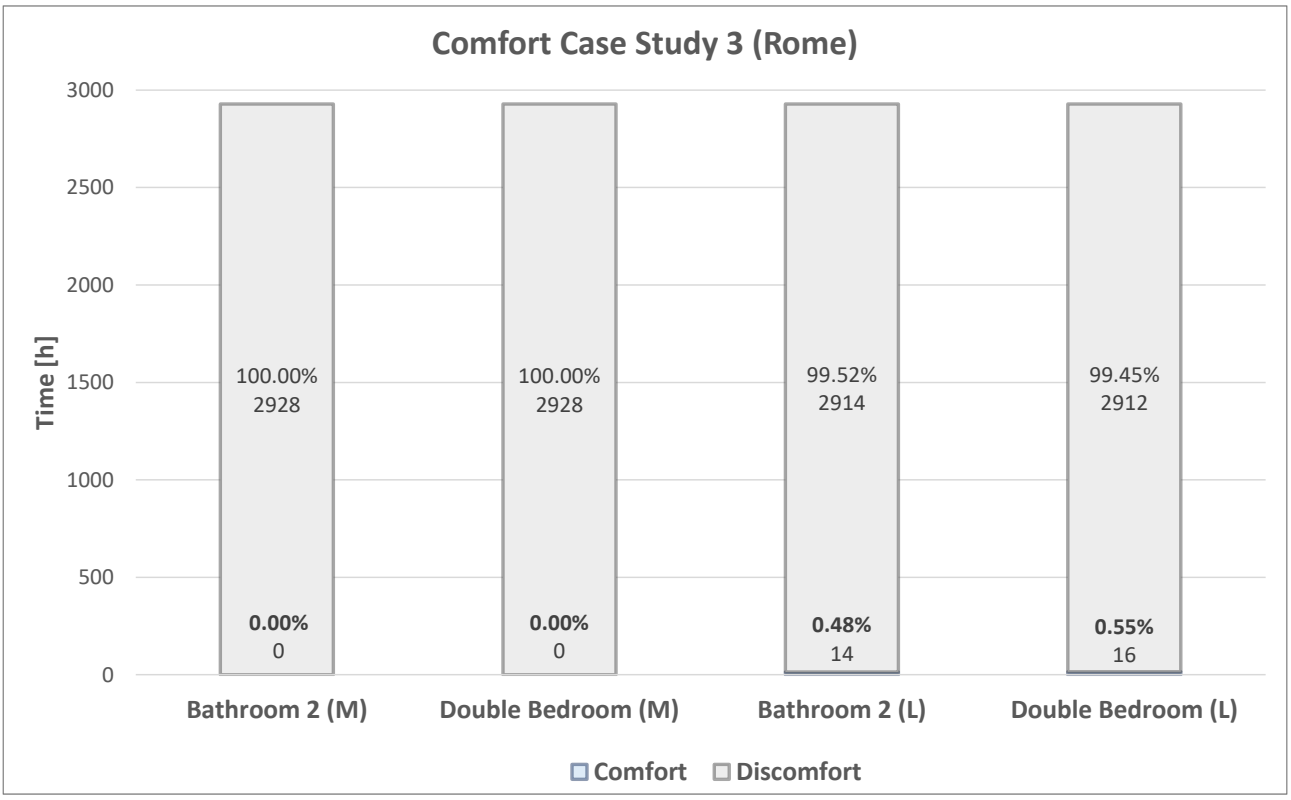

Grafico 69: Ore di Comfort e Discomfort in Funzione dell'Ambiente e della Tipologia di Struttura (Caso Studio 3)

4.8.3 Palermo

Case Study 2				
Room	Massive Structure		Lightweight Structure	
	Comfort [h]	Discomfort [h]	Comfort [h]	Discomfort [h]
Bathroom 2	825/2928	2103/2928	906/2928	2022/2928
Double Bedroom	998/2928	1930/2928	1140/2928	1788/2928

Tabella 55: Caso Studio 2, Ore di Comfort e Discomfort Totali Associate alla Tipologia di Struttura e all'Ambiente Considerato (Palermo)

Case Study 3				
Room	Massive Structure		Lightweight Structure	
	Comfort [h]	Discomfort [h]	Comfort [h]	Discomfort [h]
Bathroom 2	991/2928	1937/2928	1042/2928	1886/2928
Double Bedroom	1239/2928	1689/2928	1269/2928	1659/2928

Tabella 56: Caso Studio 2, Ore di Comfort e Discomfort Totali Associate alla Tipologia di Struttura e all'Ambiente Considerato (Palermo)

Osservando i grafici riportati di seguito è possibile effettuare le seguenti osservazioni:

- A differenza di Milano, in entrambi i casi studio e per entrambe le tipologie di strutture, l'ambiente con maggiori ore di comfort è la camera matrimoniale. Come visto in precedenza, pur essendo gli apporti solari maggiori nella camera matrimoniale rispetto al bagno 2, essa riesce a garantire un maggior numero di ore di comfort.
- Per ogni ambiente e in entrambi i casi studio, la struttura leggera garantisce un maggior numero di ore di comfort.

- Tra il caso studio 2 e il caso studio 3, per ogni ambiente e ogni tipologia di struttura, viene garantito un numero superiore di ore di comfort nel caso studio 3, ovvero nel caso si abbia un solaio di sottotetto non isolato e una copertura isolata.

Evidenziando i seguenti aspetti si può affermare che l'ambiente che garantisce un maggior numero di ore di comfort è la camera matrimoniale del caso studio 3 associata alla struttura leggera.

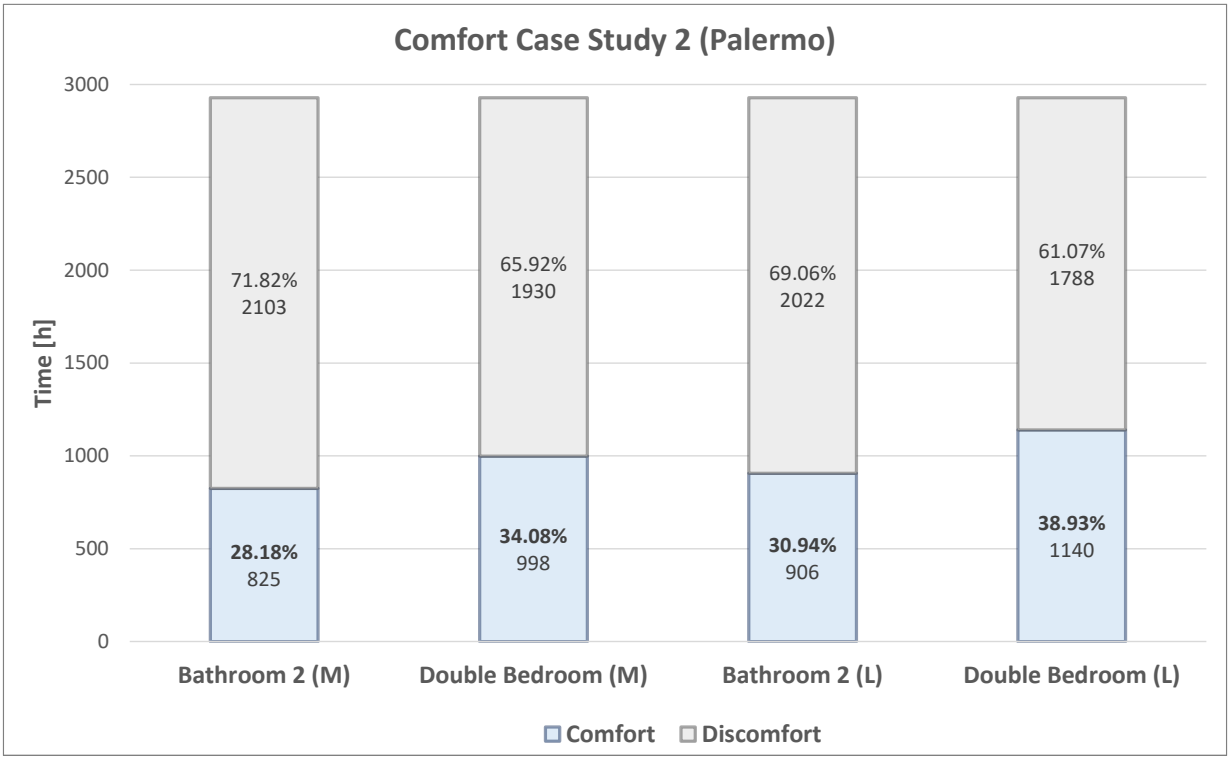

Grafico 70: Ore di Comfort e Discomfort in Funzione dell'Ambiente e della Tipologia di Struttura (Caso Studio 2)

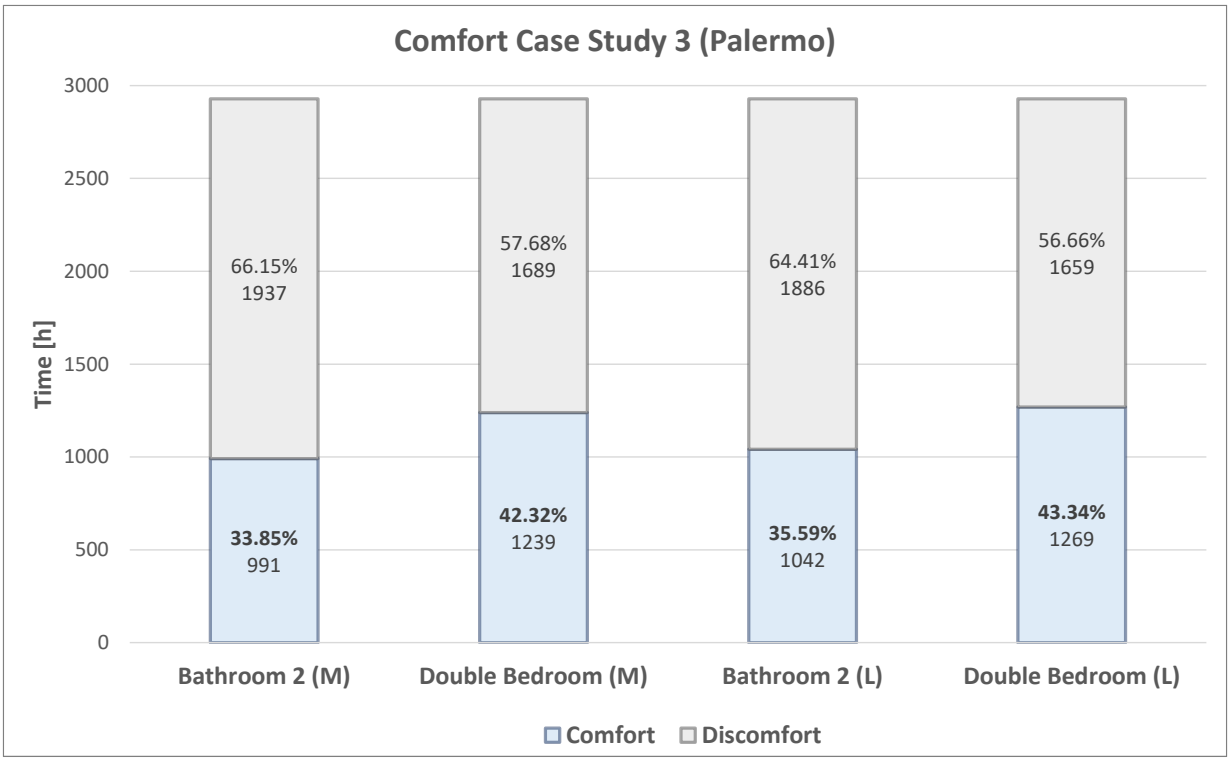

Grafico 71: Ore di Comfort e Discomfort in Funzione dell'Ambiente e della Tipologia di Struttura (Caso Studio 3)

4.8.4 Conclusioni

Ricordando le analisi sui fabbisogni di energia riportati nei paragrafi 4.4 e 4.5, esse stabilivano che la variazione percentuale dei fabbisogni di energia totali tra caso studio 2 e caso studio 3, mantenendo fissa la tipologia di struttura, e tra struttura massiva e struttura leggera, mantenendo fisso il caso studio, non era particolarmente significativa, per questo si necessitava di un'ulteriore analisi riguardo il benessere termico all'interno degli ambienti in modo tale da stabilire quale sia effettivamente la struttura e il caso studio migliore. Utilizzando il metodo dinamico riportato nella UNI EN ISO 52016 per il calcolo delle temperature operative, e il metodo adattivo riportato nella UNI EN 15251 per il calcolo delle ore di comfort, è possibile affermare che:

Per le località di Milano e Palermo il caso studio 3 con struttura leggera è la soluzione che consente di garantire un maggior numero di ore di comfort, anche se comunque risultano essere molto superiori le ore di discomfort. Quindi a parità di fabbisogni di energia totale questa scelta (struttura leggera con solaio di sottotetto non isolato) garantisce un comfort estivo migliore.

Per la località di Roma invece le strutture scelte, sia nel caso studio 2 che nel caso studio 3, non riescono a garantire un comfort interno significativo.

4.9 Valutazione del Benessere Termico in Funzione della Tipologia di Struttura Mediante il Modello di Comfort Adattivo con Maggiore Portata d'Aria Notturna

Nell'analisi precedente la portata d'aria di ogni ambiente è stata fissata costante durante l'intero arco della giornata, utilizzando un tasso di ricambio d'aria pari a 0,50. Nella seguente analisi si è scelto di aumentare il tasso di ricambio d'aria, portandolo al valore di 0,70, dalle ore 23:00 alle ore 7:00 sempre nel periodo 1 giugno – 30 settembre, così da poter simulare l'apertura notturna delle finestre durante il periodo estivo. Nei seguenti sottoparagrafi verrà trattato per ogni località il confronto tra le ore di comfort associate ai casi con n costante e le ore di comfort associate ai casi con n maggiorato nelle ore notturne.

4.9.1 Milano

L'andamento dei risultati associati all'aumento di portata d'aria notturna è il medesimo riscontrato nell'analisi precedente, ovvero:

- L'ambiente con il maggior numero di ore di comfort, fissata la tipologia di struttura, è il bagno 2.
- La struttura con il maggior numero di ore di comfort, fissato l'ambiente, è la struttura leggera.
- Fissata la tipologia di struttura e l'ambiente, il caso studio 3 garantisce il maggior numero di ore di comfort rispetto al caso studio 2.

Dal confronto proposto è possibile notare che introducendo una maggiore portata d'aria notturna le ore di comfort aumentino, in particolare la struttura massiva risente maggiormente della variazione di portata d'aria notturna, andando ad aumentare le ore di comfort in modo più significativo rispetto alla struttura leggera, restando comunque caratterizzata da un minor numero di ore di comfort rispetto a quest'ultima. È inoltre possibile evidenziare come l'aumento di portata d'aria notturna influenzi maggiormente il caso studio 2 rispetto al caso studio 3.

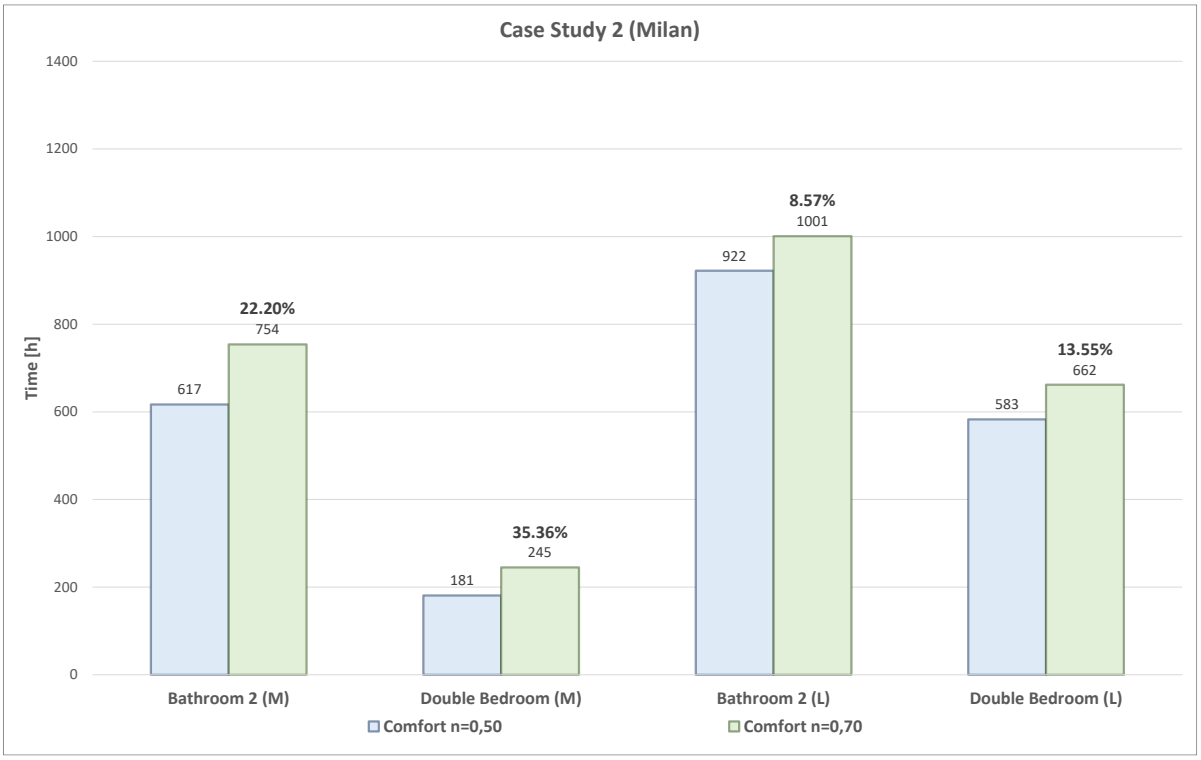

Grafico 72: Confronto Ore di Comfort Aumentando la Portata d'Aria Notturna (Caso Studio 2)

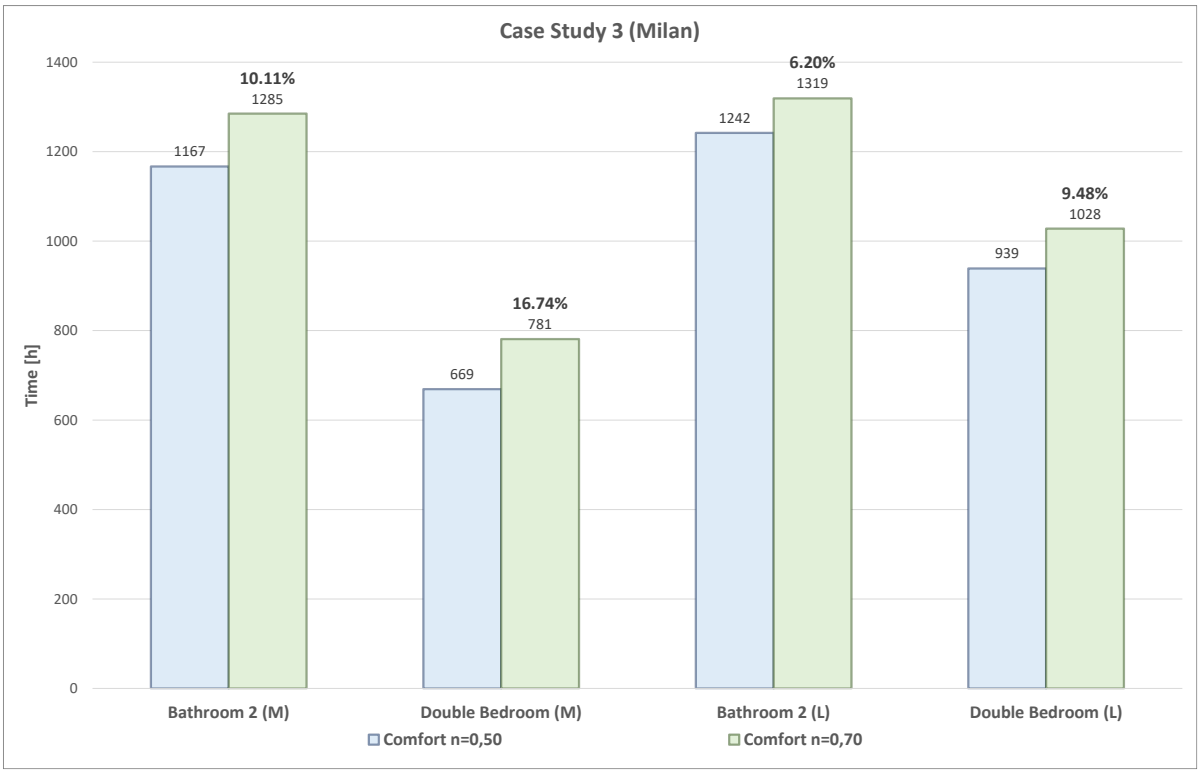

Grafico 73: Confronto Ore di Comfort Aumentando la Portata d'Aria Notturna (Caso Studio 3)

4.9.2 Roma

Anche aumentando la portata d'aria notturna non si riesce a raggiungere per la località di Roma un significativo numero di ore di comfort per nessun caso studio e struttura proposta.

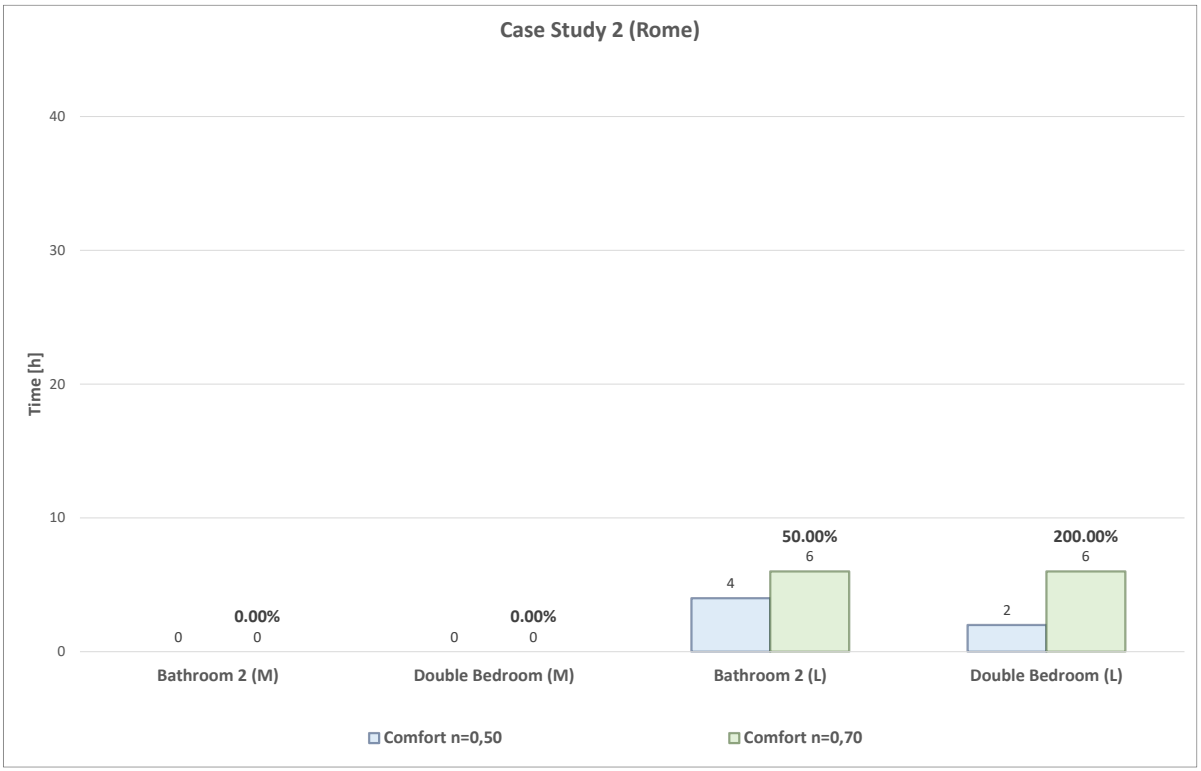

Grafico 74: Confronto Ore di Comfort Aumentando la Portata d'Aria Notturna (Caso Studio 2)

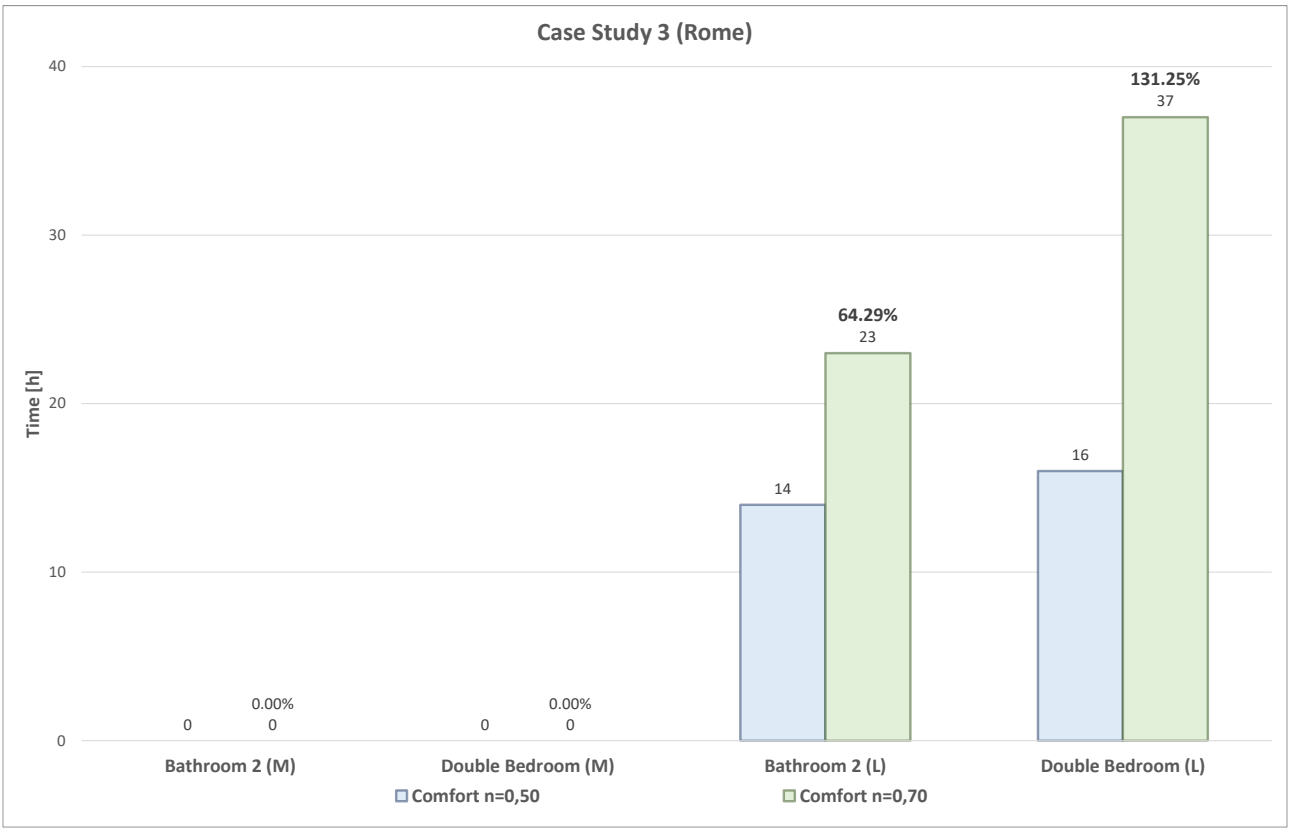

Grafico 75: Confronto Ore di Comfort Aumentando la Portata d'Aria Notturna (Caso Studio 3)

4.9.3 Palermo

L'andamento dei risultati associati all'aumento di portata d'aria notturna è il medesimo riscontrato nell'analisi precedente, ovvero:

- L'ambiente con il maggior numero di ore di comfort, fissata la tipologia di struttura, è la camera matrimoniale.
- La struttura con il maggior numero di ore di comfort, fissato l'ambiente, è la struttura leggera.
- Fissata la tipologia di struttura e l'ambiente, il caso studio 3 garantisce il maggior numero di ore di comfort rispetto al caso studio 2.

Dal confronto proposto è possibile nuovamente notare che introducendo una maggiore portata d'aria notturna le ore di comfort aumentino. Nel caso studio 2 la struttura maggiormente influenzata dalla variazione di portata notturna è la struttura massiva come per la località di Milano (anche se non vi è una significativa differenza con le percentuali associate alla struttura leggera), ma le percentuali che indicano l'aumento delle ore di comfort introducendo una portata notturna maggiore sono molto minori rispetto alle percentuali associate a Milano. Nel caso studio 3 invece il comportamento si inverte, è la struttura leggera ad essere maggiormente influenzata dall'aumento di portata notturna e non più la massiva. Si nota quindi come l'aumento della portata d'aria notturna garantisca comunque un maggior numero di ore di comfort, ma il comportamento al variare del caso studio e della tipologia di struttura risulta diverso rispetto al comportamento studiato per la località di Milano.

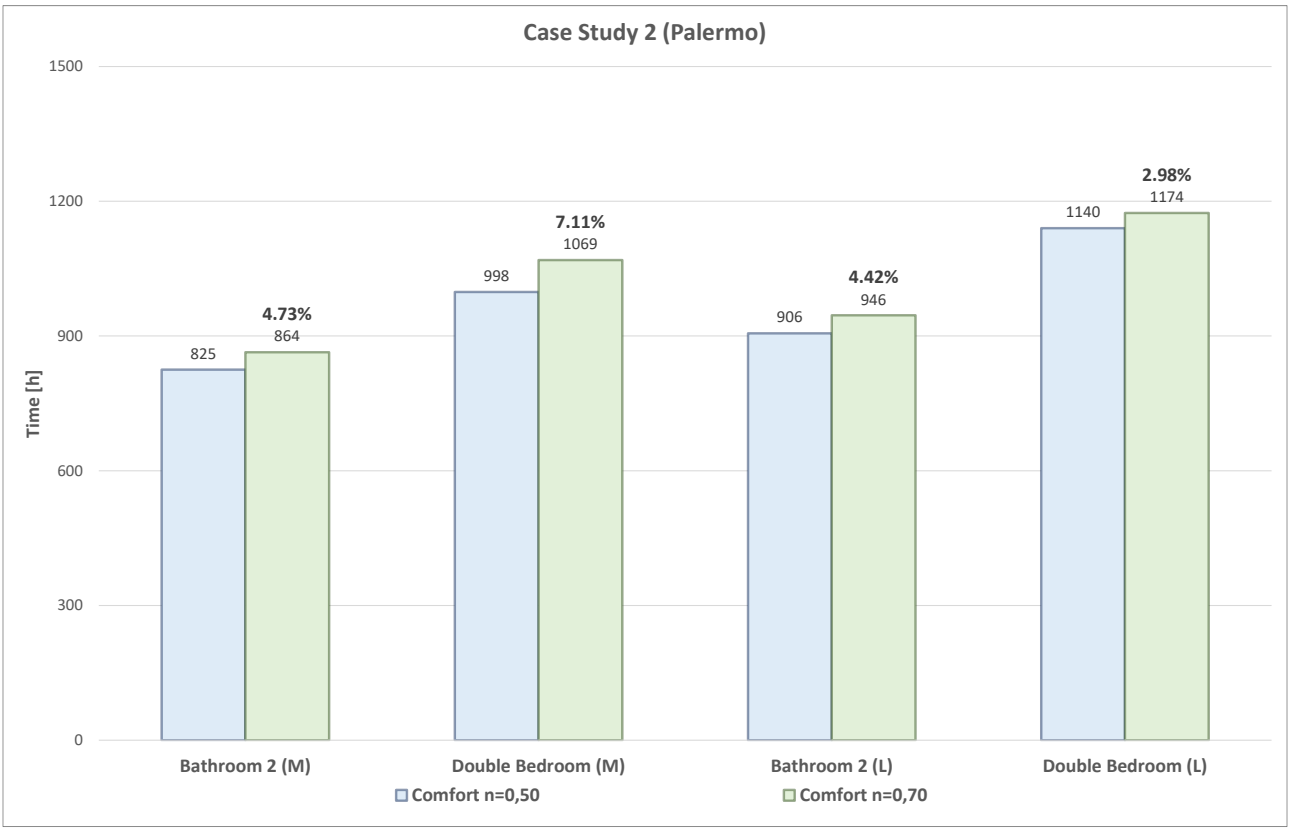

Grafico 76: Confronto Ore di Comfort Aumentando la Portata d'Aria Notturna (Caso Studio 2)

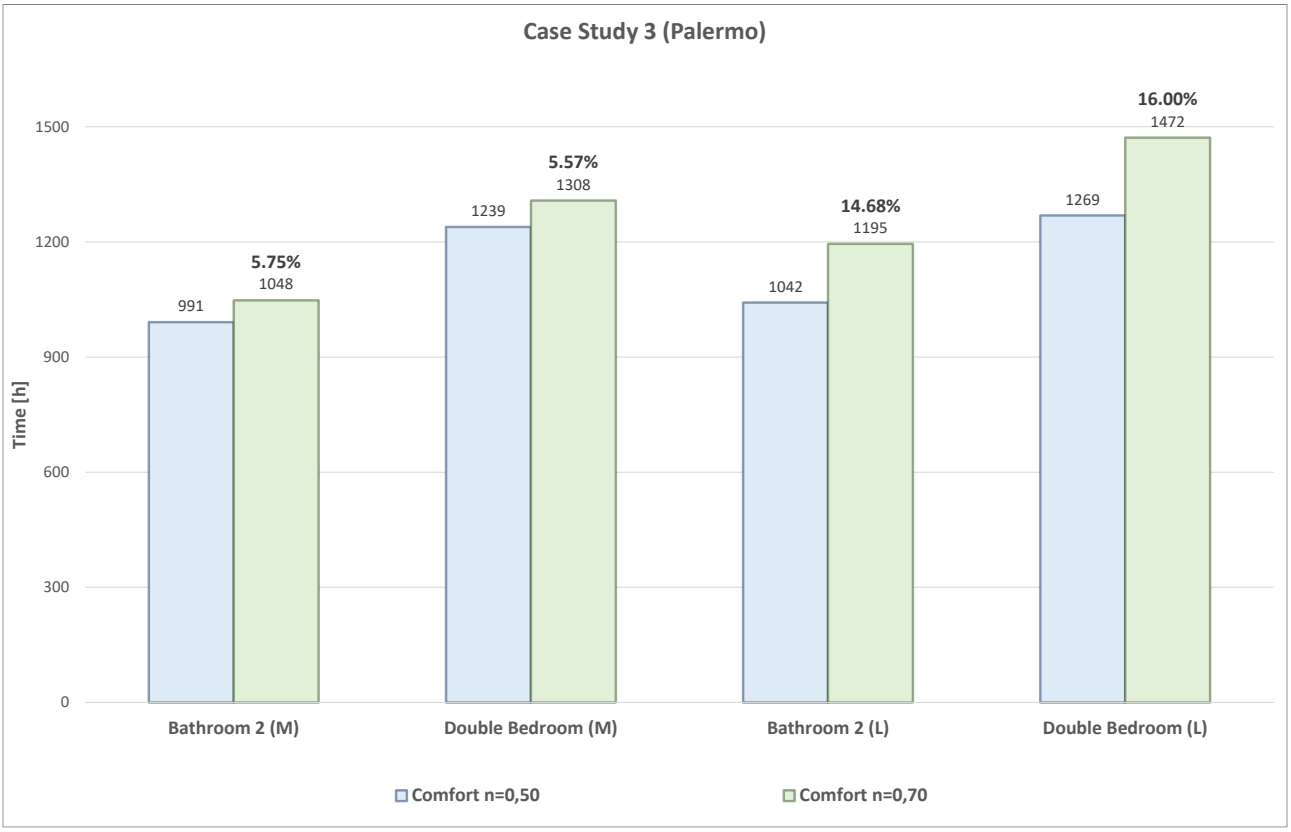

Grafico 77: Confronto Ore di Comfort Aumentando la Portata d'Aria Notturna (Caso Studio 3)

4.9.4 Conclusioni

Utilizzando il metodo dinamico riportato nella UNI EN ISO 52016 per il calcolo delle temperature operative, e il metodo adattivo riportato nella UNI EN 15251 per il calcolo delle ore di comfort, è possibile affermare che all'aumentare della portata di aria notturna aumenti il numero di ore di comfort. Il caso studio che assicura il maggior numero di ore di comfort è nuovamente il caso studio 3 associato alla struttura leggera. Si è notato che l'aumento di portata di aria notturna incide in maniera diversa per la località di Milano e di Palermo, in particolare:

A Milano l'aumento di portata notturna comporta in entrambi i casi studio sempre una maggiore incidenza sulla struttura massiva rispetto alla leggera, inoltre il caso studio 2, a parità di struttura, risente maggiormente della variazione di portata rispetto al caso studio 3.

A Palermo l'aumento di portata notturna comporta per il caso studio 2 una maggiore incidenza sulla struttura massiva, mentre nel caso studio 3 è la struttura leggera a risentire maggiormente dell'aumento di portata.

4.10 Andamento della Temperatura Operativa in Funzione dell'Intermittenza dell'Impianto di Riscaldamento

Il seguente paragrafo si pone come obiettivo la valutazione dell'andamento della temperatura operativa, dovuto all'accensione e allo spegnimento dell'impianto di riscaldamento, associato ad una struttura massiva e ad una struttura leggera. Si vuole quindi determinare quale fra le due tipologie di strutture sia minormente influenzata dell'intermittenza dell'impianto. L'analisi verrà effettuata sulla camera matrimoniale del solo caso studio 2 (edificio dotato di solaio di sottotetto isolato), poiché come visto nel paragrafo 4.4 esso risulta essere energicamente più efficiente nel periodo invernale rispetto al caso studio 3 (edificio dotato di solaio di sottotetto non isolato). Si ricordi che per ogni località le trasmittanze termiche associate agli elementi dell'involucro edilizio sono circa costanti tra struttura leggera e massiva. Di seguito sono riportate le caratteristiche degli elementi costituenti l'involucro associati al caso studio 2 sia per la struttura leggera che per la struttura massiva, in particolare sono evidenziate la trasmittanza termica e la capacità termica interna areica.

Case Study 2					
Structure	Simulated on	Massive Structure		Lightweight Structure	
		Thermal Transmittance U	Areal Internal Heat Capacity k_J	Thermal Transmittance U	Areal Internal Heat Capacity k_J
		[W/(m²K)]	[kJ/(m²K)]	[W/(m²K)]	[kJ/(m²K)]
External Wall	Milan	0.22	34.56	0.22	21.64
	Rome	0.24	35.77	0.24	22.17
	Palermo	0.36	40.55	0.36	22.71
Sub-Roofing Floor (Isolated)	Milan	0.24	58.05	0.24	5.96
	Rome	0.27	34.40	0.27	5.24
	Palermo	0.38	58.45	0.37	4.20
Internal Wall	Milan, Rome Palermo	1.13	50.99	1.43	30.50
Internal Floor	Milan, Rome Palermo	0.35	77.37	0.48	78.48

Tabella 57: Trasmittanza Termica e Capacità Termica Interna Areica degli Elementi Costituenti l'Involucro Edilizio (Caso Studio 2)

Il calcolo delle temperature operative orarie e delle potenze fornite dall'impianto è stato effettuato mediante l'applicazione del metodo dinamico riportato nella norma UNI EN ISO 52016. Per ogni località verranno realizzate due tipologie di analisi:

La prima riguarderà il decadimento della temperatura operativa a seguito dello spegnimento dell'impianto di riscaldamento a potenza infinita, ovvero si considera un impianto che può fornire alla camera matrimoniale una potenza nettamente superiore rispetto a quella di cui avrebbe bisogno nella realtà.

La seconda analisi riguarderà il tempo di ripresa della temperatura operativa a seguito dell'accensione dell'impianto che questa volta fornirà una potenza ridotta del 50% rispetto alla potenza massima utilizzata nella camera matrimoniale durante l'intero periodo invernale. Per tempo di ripresa si intende il tempo impiegato per raggiungere la temperatura operativa desiderata (20°C) dopo l'accensione dell'impianto.

4.10.1 Potenza Infinita: Decadimento della Temperatura Operativa a Seguito dello Spegnimento dell'Impianto di Riscaldamento

In questa analisi l'impianto, nei momenti in cui risulterà acceso, fornirà ad ogni ora la potenza massima necessaria per assicurare una temperatura operativa pari alla temperatura di set-point fissata (20°C). Per ogni località l'analisi viene effettuata sul giorno caratterizzato dalle temperature esterne più basse durante l'interno periodo invernale, considerando come ora iniziale l'ora di accensione dell'impianto e come ora finale la medesima ma del giorno successivo.

4.10.1.1 Milano (Zona Climatica E)

Secondo il DPR 412 del 26 agosto 1993, per la zona climatica E l'accensione dell'impianto di riscaldamento è consentita per 14 ore giornaliere dal 15 ottobre al 15 aprile. A rispetto di tale norma, l'impianto viene considerato acceso dalle ore 6:00 alle ore 13:00 e dalle ore 17:00 alle ore 24:00. Durante il periodo invernale il giorno caratterizzato dalle temperature esterne più basse risulta essere il 23 dicembre. Nella tabella proposta di seguito sono riportate le temperature operative orarie associate alle due tipologie di strutture, con evidenziate le potenze necessarie per garantire la temperatura operativa pari alla temperatura di set-point nelle ore in cui l'impianto risulta acceso.

23 December (Milan)						
t	T_e	$T_{op,M}$	$T_{op,L}$	ΔT_{op}	$P_{H,M}$	$P_{H,L}$
[h]	[°C]	[°C]	[°C]	[-]	[W]	[W]
6:00	-1.4	**20**	**20**	0	**852**	**887**
7:00	-1.3	20	20	0	531	552
8:00	-1.6	20	20	0	475	499
9:00	-1.8	20	20	0	428	454
10:00	-1.2	20	20	0	339	363
11:00	-0.5	20	20	0	258	283
12:00	0.6	20	20	0	193	219
13:00	1.8	**20**	**20**	0	**117**	**139**
14:00	2	19.8	19.7	0.1	0	0
15:00	1.5	19.6	19.4	0.2	0	0
16:00	1.3	19.3	18.9	0.4	0	0
17:00	0.9	**20**	**20**	0	**533**	**567**
18:00	0.5	20	20	0	395	404
19:00	0.6	20	20	0	373	380
20:00	1.1	20	20	0	356	363
21:00	1.1	20	20	0	350	357
22:00	0.8	20	20	0	350	356
23:00	0.5	20	20	0	351	357
0:00	0.3	**20**	**20**	0	**351**	**358**
1:00	0.6	19.4	19.1	0.3	0	0
2:00	1.1	19.2	18.7	0.5	0	0
3:00	0.9	19	18.4	0.6	0	0
4:00	0.5	18.8	18.2	0.6	0	0
5:00	0	18.7	18	0.7	0	0
6:00	-0.2	**20**	**20**	0	**844**	**902**
$T_{op,min}$		18.7	18	0.7		

Tabella 58: Temperature Operative e Potenze Fornite dall'Impianto in Funzione della Tipologia di Struttura (Milano)

Le righe della tabella caratterizzate dal colore verde segnalano l'accensione dell'impianto, mentre le righe caratterizzate dal colore celeste segnalano il suo spegnimento. Attraverso questi dati è possibile realizzare un grafico riportante per ogni ora la temperatura operativa e la potenza fornita dall'impianto (nelle ore in cui risulta acceso) associate alle due tipologie di strutture, in relazione alla temperatura esterna.

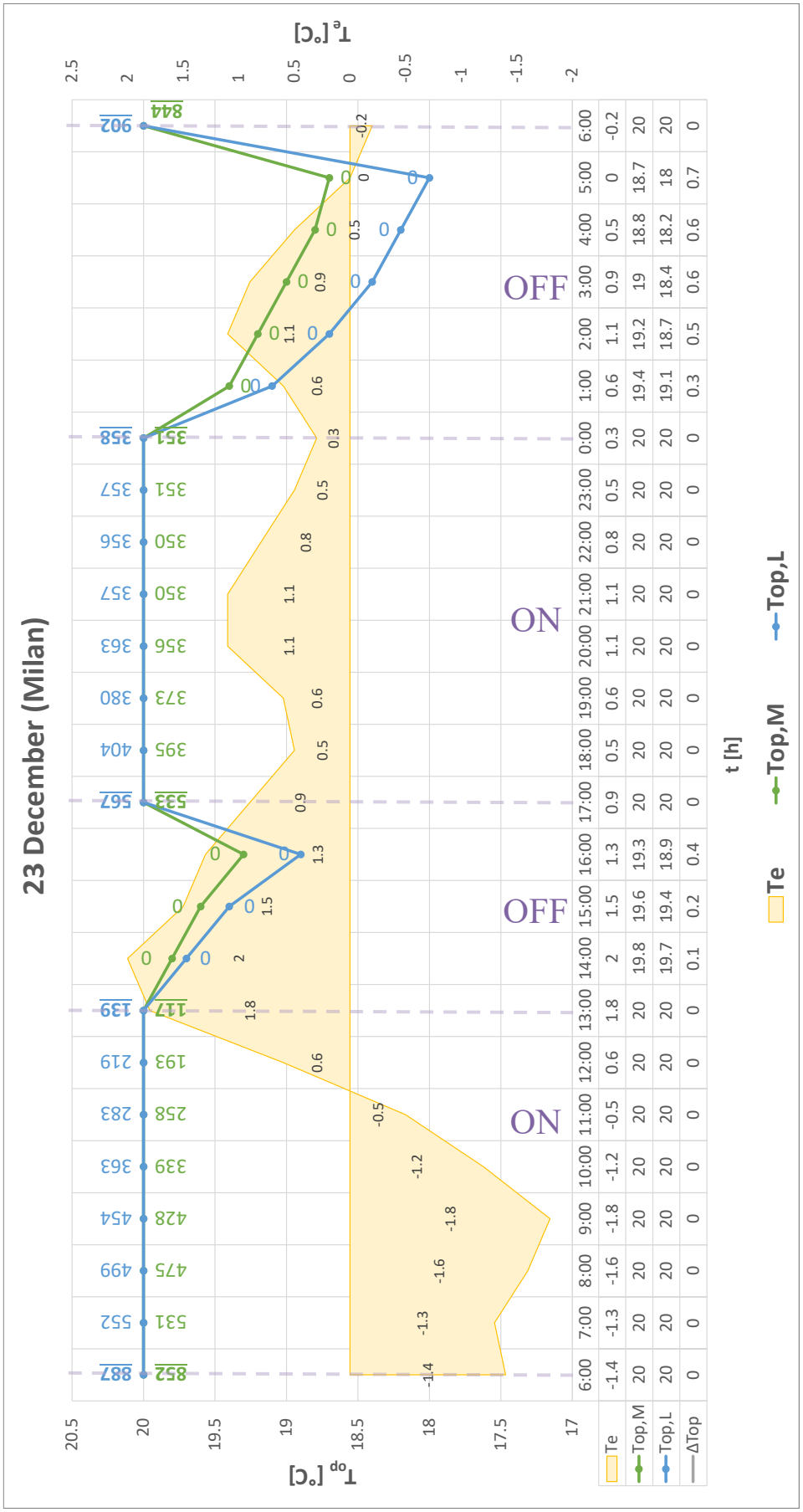

Grafico 78: Decadimento della Temperatura Operativa a Seguito dello Spegnimento dell'Impianto in Funzione della Tipologia di Struttura, i Numeri Indicano la Potenza Fornita dall'Impianto per Garantire una Temperatura Operativa pari a 20°C (Milano)

Osservando il grafico è possibile notare che nelle ore notturne lo spegnimento dell'impianto causa una maggior diminuzione della temperatura operativa rispetto alla diminuzione che si ha a causa dello spegnimento dell'impianto nelle ore pomeridiane. Questo è dovuto al fatto che, oltre alla diversa temperatura esterna, durante la notte l'impianto rimane spento per un maggior numero di ore rispetto al pomeriggio. Ciò significa che maggiore è il numero di ore in cui l'impianto rimane spento e maggiore sarà il decadimento della temperatura operativa. A questo concetto è legata la potenza necessaria per raggiungere la temperatura di set-point dopo lo spegnimento dell'impianto. Dal grafico è possibile notare che la potenza richiesta nella prima ora di accensione dell'impianto è tanto maggiore tanto più tempo l'impianto rimane spento e tanto più bassa risulta la temperatura esterna.

Con lo spegnimento dell'impianto, la struttura leggera presenta una maggiore diminuzione della temperatura operativa rispetto alla struttura massiva, questo aspetto è legato alla diversa inerzia termica caratterizzante le due tipologie di strutture. Avendo imposto all'impianto una potenza molto elevata rispetto a quella effettivamente necessaria alla camera matrimoniale, la temperatura operativa di 20°C viene subito raggiunta nell'ora di accensione dell'impianto, sia per la struttura leggera che per la struttura massiva, con l'unica differenza che la potenza impiegata risulta essere maggiore nella struttura leggera poiché essa raggiunge temperature operative più basse rispetto alla struttura massiva. Durante le successive ore di accensione dell'impianto, la potenza fornita si ridurrà poiché entra in gioco l'accumulo termico e quindi di nuovo l'inerzia legata all'edificio. Tale potenza, necessaria per mantenere la temperatura di set-point, risulta sempre superiore nella struttura leggera rispetto alla struttura massiva, ma la differenza di potenza tra le due strutture risulta sempre meno evidente più l'impianto rimane acceso.

Unendo questa serie di osservazione è possibile concludere che:

Maggiore è il numero di ore in cui l'impianto rimane spento, maggiore è il decadimento della temperatura operativa, questo comporta di conseguenza una maggiore richiesta di potenza da parte dell'impianto di riscaldamento per poter raggiungere la temperatura di set-point stabilita nell'ora di accensione dell'impianto.

La struttura leggera ha un decadimento di temperatura operativa maggiore rispetto alla struttura massiva ($T_{op,min,M}$ - $T_{op,min,L}$ =0,7°C), inoltre necessita sempre di una maggiore potenza durante l'accensione dell'impianto per raggiungere e mantenere la temperatura di set-point. Questo significa che la struttura massiva, essendo dotata di capacità termica più elevata rispetto alla struttura leggera, riesce ad accumulare una maggiore quantità di calore, ciò permette di richiedere all'impianto una minore potenza e di garantire temperature operative superiori rispetto alla struttura leggera durante lo spegnimento dell'impianto. La struttura leggera è quindi più influenzata dall'intermittenza dell'impianto di riscaldamento rispetto alla struttura massiva.

4.10.1.2 Roma (Zona Climatica D)

Secondo il DPR 412 del 26 agosto 1993, per la zona climatica D l'accensione dell'impianto di riscaldamento è consentita per 12 ore giornaliere dal 1 novembre al 15 aprile. A rispetto di tale norma l'impianto viene considerato acceso dalle ore 6:00 alle ore 12:00 e dalle ore 18:00 alle ore 24:00. Durante il periodo invernale il giorno caratterizzato dalle temperature esterne più basse risulta essere il 14 febbraio. Nella tabella proposta di seguito sono riportate le temperature operative orarie associate alle due tipologie di strutture, con evidenziate le potenze necessarie per garantire la temperatura operativa pari alla temperatura di set-point nelle ore in cui l'impianto risulta acceso.

14 February (Rome)						
t	T_e	$T_{op,M}$	$T_{op,L}$	ΔT_{op}	$P_{H,M}$	$P_{H,L}$
[h]	[°C]	[°C]	[°C]	[-]	[W]	[W]
6:00	0.2	**20**	**20**	0	**489**	**547**
7:00	0	20	20	0	288	319
8:00	1.3	20	20	0	47	71
9:00	3.2	20.3	20.3	0	0	0
10:00	6	20.7	20.7	0	0	0
11:00	8	21.1	21.2	-0.1	0	0
12:00	9.8	**21.5**	**21.5**	0	**0**	**0**
13:00	11.1	21.9	22	-0.1	0	0
14:00	11.8	22.1	22.2	-0.1	0	0
15:00	11.6	22	22.2	-0.2	0	0
16:00	11	21.7	21.9	-0.2	0	0
17:00	10.6	21.2	21.3	-0.1	0	0
18:00	9.6	**20.9**	**21**	-0.1	**0**	**0**
19:00	9.2	20.7	20.8	-0.1	0	0
20:00	8.2	20.5	20.6	-0.1	0	0
21:00	7	20.3	20.4	-0.1	0	0
22:00	5.6	20.1	20.2	-0.1	0	0
23:00	4.7	20	20	0	19	2
0:00	3.7	**20**	**20**	0	**87**	**84**
1:00	3.4	19.8	19.8	0	0	0
2:00	3.3	19.6	19.6	0	0	0
3:00	2.2	19.5	19.4	0.1	0	0
4:00	1.4	19.4	19.3	0.1	0	0
5:00	2.1	19.3	19.2	0.1	0	0
6:00	2.4	**20**	**20**	0	**408**	**454**
$T_{op,min}$		19.3	19.2	0.1		

Tabella 59: Temperature Operative e Potenze Fornite dall'Impianto in Funzione della Tipologia di Struttura (Roma)

Le righe della tabella caratterizzate dal colore verde segnalano l'accensione dell'impianto, mentre le righe caratterizzate dal colore celeste segnalano il suo spegnimento. Attraverso questi dati è possibile realizzare un grafico riportante per ogni ora la temperatura operativa e la potenza fornita dall'impianto (nelle ore in cui risulta acceso) associate alle due tipologie di strutture, in relazione alla temperatura esterna.

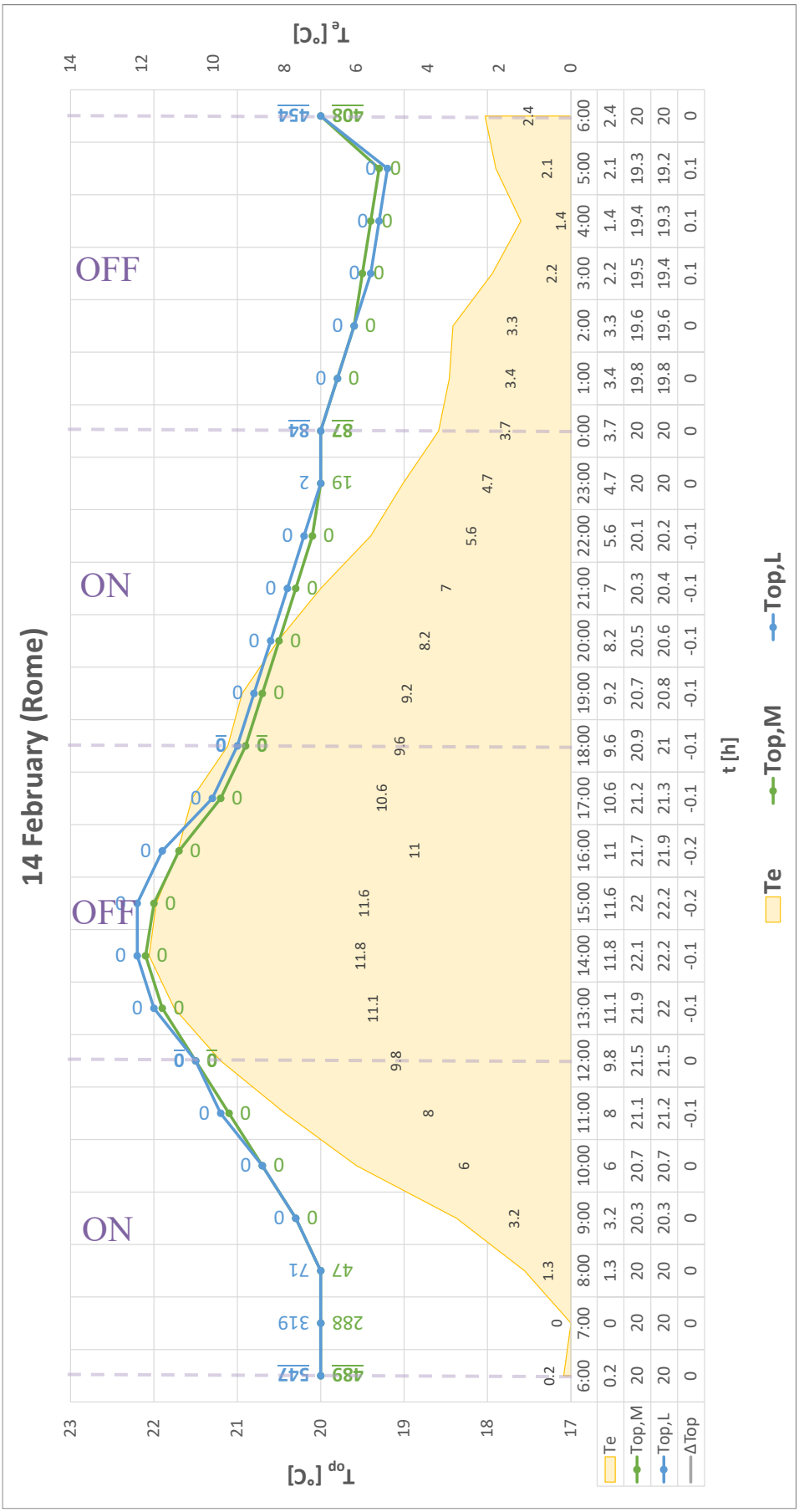

Grafico 79: Decadimento della Temperatura Operativa a Seguito dello Spegnimento dell'Impianto in Funzione della Tipologia di Struttura, i Numeri Indicano la Potenza Fornita dall'Impianto per Garantire una Temperatura Operativa pari a 20°C (Roma 1)

Osservando il grafico è possibile notare come le ore imposte per l'accensione dell'impianto siano in realtà eccessive, poiché la temperatura operativa risulta superiore alla temperatura di set-point anche senza l'accensione dell'impianto. In particolare, l'impianto di riscaldamento fornisce una certa potenza dalle ore 6:00 alle ore 8:00 e dalle ore 23:00 alle ore 24:00, quindi solo per cinque ore e non dodici. Questo comportamento dipende dal dato climatico, ma osservando le temperature esterne si nota come non siano eccessivamente elevate, inoltre il picco di temperatura operativa che raggiungono le due tipologie di strutture è proprio in prossimità della temperatura esterna più elevata, ma ciò non può dipendere solo dalla temperatura esterna poiché l'edificio non risponde immediatamente ai cambiamenti climatici, ma avrà un certo sfasamento nel tempo rispetto ad essi. Per approfondire l'andamento delle temperature operative si riporta nel grafico successivo non più la temperatura esterna, ma la radiazione solare Sud ed Ovest (ricordiamo che la camera matrimoniale oggetto di studio ha esposizione Sud-Ovest). Essendo la radiazione molto elevata l'aumento della temperatura operativa sarà sicuramente causato da quest'ultima, inoltre è possibile notare come il picco delle temperature operative si verifichi con un certo sfasamento rispetto al picco delle radiazioni. In questo caso, essendo comunque il giorno del periodo invernale con le temperature esterne più basse, l'elevata radiazione solare permette di ridurre le ore di accensione dell'impianto, inoltre l'accumulo termico che avviene nell'arco della giornata a causa della presenza di una radiazione così elevata permette di non scendere sotto i 19°C durante le ore notturne in entrambe le strutture, ciò significa che servirà una minore potenza di ripresa riferita alla successiva accensione dell'impianto.

Essendo le temperature operative sempre piuttosto elevante, la differenza tra le due tipologie di strutture non risulta essere significativa come nel caso di Milano, ma è possibile notare che la struttura leggera tende a salire maggiormente di temperatura a causa della radiazione, per poi scendere maggiormente di temperatura durante le ore notturne. La differenza tra le temperature operative associate alle due tipologie di strutture è comunque sempre nell'ordine di un decimo di grado.

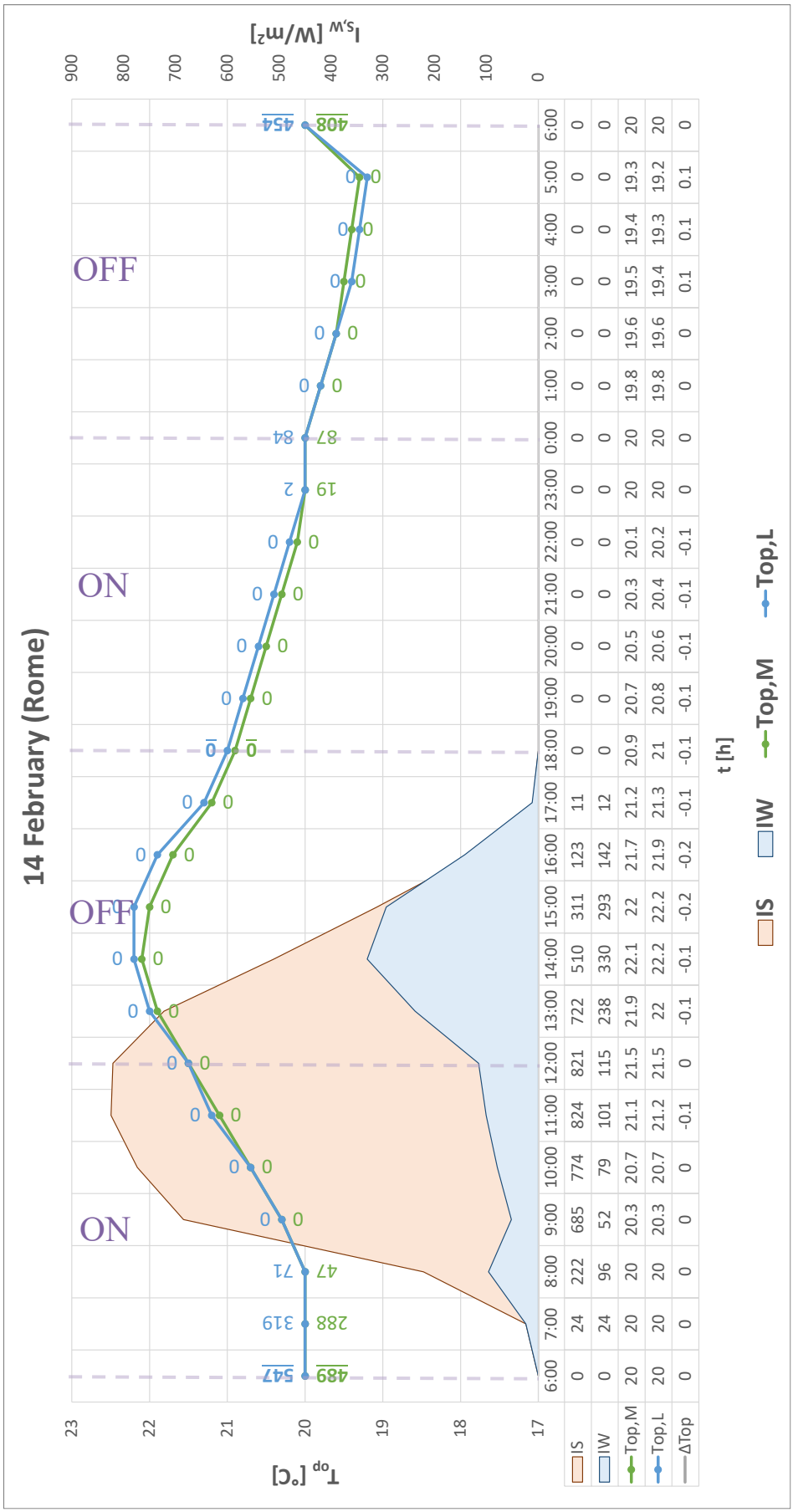

Grafico 80: Decadimento della Temperatura Operativa a Seguito dello Spegnimento dell'Impianto in Funzione della Tipologia di Struttura, i Numeri Indicano la Potenza Fornita dall'Impianto per Garantire una Temperatura Operativa pari a 20°C (Roma 2)

4.10.1.3 Palermo (Zona Climatica B)

Secondo il DPR 412 del 26 agosto 1993, per la zona climatica B l'accensione dell'impianto di riscaldamento è consentita per 8 ore giornaliere dal 1 dicembre al 31 marzo. A rispetto di tale norma l'impianto viene considerato acceso dalle ore 7:00 alle ore 11:00 e dalle ore 19:00 alle ore 23:00. Durante il periodo invernale il giorno caratterizzato dalle temperature esterne più basse risulta essere il 14 febbraio. Nella tabella proposta di seguito sono riportate le temperature operative orarie associate alle due tipologie di strutture, con evidenziate le potenze necessarie per garantire la temperatura operativa pari alla temperatura di set-point nelle ore in cui l'impianto risulta acceso.

23 January (Palermo)						
t	T_e	$T_{op,M}$	$T_{op,L}$	ΔT_{op}	$P_{H,M}$	$P_{H,L}$
[h]	[°C]	[°C]	[°C]	[-]	[W]	[W]
7:00	4.1	**20**	**20**	0	**900**	**1197**
8:00	6.4	20	20	0	464	639
9:00	7.9	20	20	0	345	502
10:00	8.5	20	20	0	285	426
11:00	9.1	**20**	**20**	0	**188**	**308**
12:00	9.2	19.7	19.3	0.4	0	0
13:00	8.7	19.5	18.9	0.6	0	0
14:00	8.4	19.3	18.6	0.7	0	0
15:00	8.4	19.2	18.4	0.8	0	0
16:00	7.6	19.1	18.2	0.9	0	0
17:00	6.8	18.9	17.9	1	0	0
18:00	6.4	18.8	17.7	1.1	0	0
19:00	6.0	**20**	**20**	0	**819**	**1023**
20:00	6.5	20	20	0	506	619
21:00	6.8	20	20	0	444	544
22:00	7.0	20	20	0	408	502
23:00	7.1	**20**	**20**	0	**385**	**474**
0:00	7.1	19.4	18.9	0.5	0	0
1:00	6.8	19.1	18.4	0.7	0	0
2:00	6.7	19	18.1	0.9	0	0
3:00	5.6	18.8	17.8	1	0	0
4:00	6.0	18.7	17.6	1.1	0	0
5:00	6.3	18.6	17.4	1.2	0	0
6:00	7.5	18.6	17.3	1.3	0	0
7:00	7.1	**20**	**20**	0	**932**	**1188**
$T_{op,min}$		18.6	17.3	1.3		

Tabella 60: Temperature Operative e Potenze Fornite dall'Impianto in Funzione della Tipologia di Struttura (Palermo)

Le righe della tabella caratterizzate dal colore verde segnalano l'accensione dell'impianto, mentre le righe caratterizzate dal colore celeste segnalano il suo spegnimento. Attraverso questi dati è possibile realizzare un grafico riportante per ogni ora la temperatura operativa e la potenza fornita dall'impianto (nelle ore in cui risulta acceso) associate alle due tipologie di strutture, in relazione alla temperatura esterna.

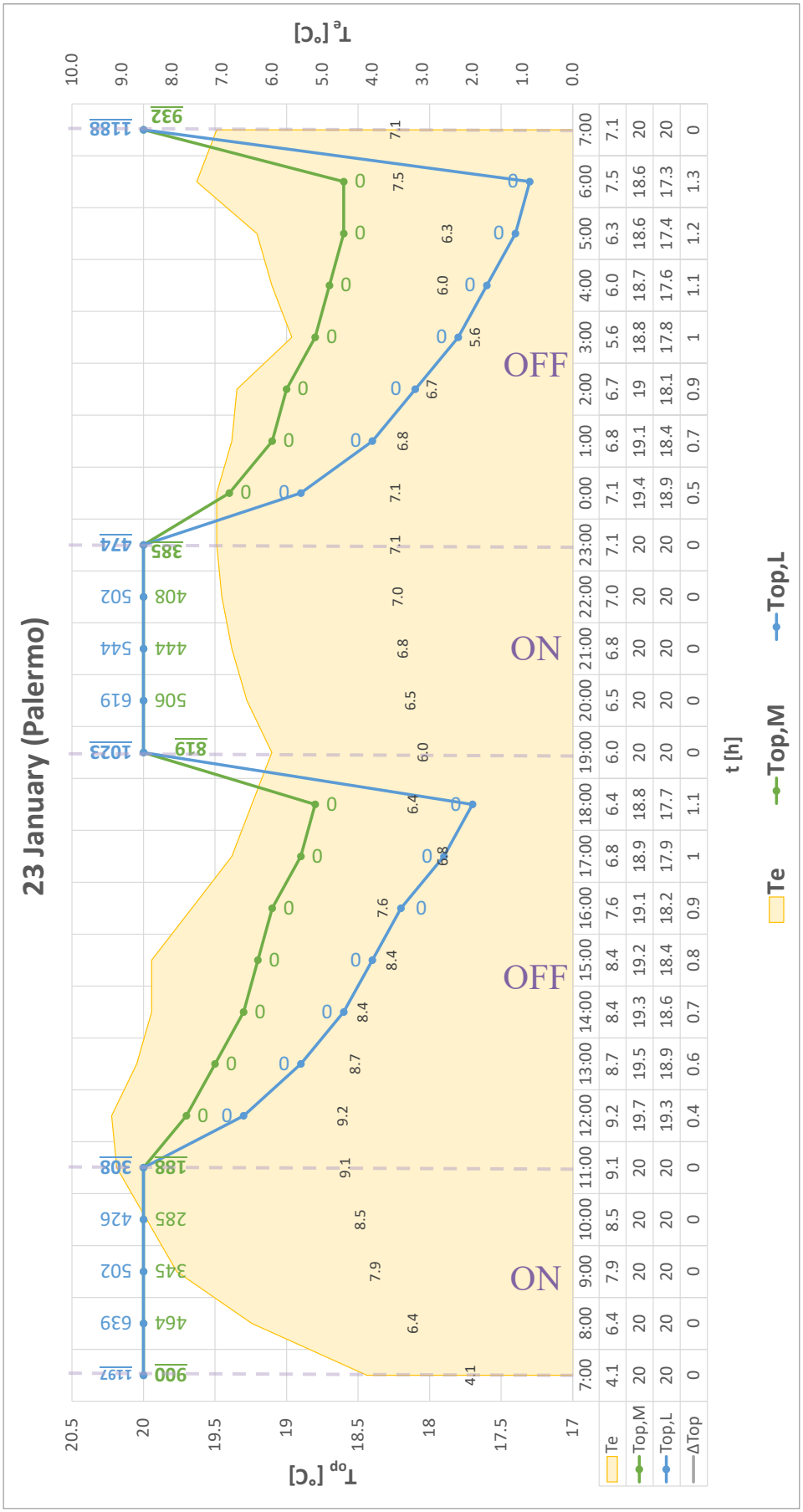

Grafico 81: Decadimento della Temperatura Operativa a Seguito dello Spegnimento dell'Impianto in Funzione della Tipologia di Struttura, i Numeri Indicano la Potenza Fornita dall'Impianto per Garantire una Temperatura Operativa pari a 20°C (Palermo)

Le stesse osservazioni effettuate per la località di Milano possono essere estese per Palermo, dove però si nota un maggior decadimento della temperatura operativa a seguito dello spegnimento dell'impianto, pur essendo la temperatura esterna maggiore rispetto al caso di Milano. Ciò è dovuto ad un minor numero di ore di accensione dell'impianto di riscaldamento e alle trasmittanze termiche dell'involucro più elevate. Un maggior decadimento di temperatura operativa significa dover fornire una maggiore potenza di ripresa affinché nell'ora di accensione dell'impianto si raggiunga la temperatura di set-point desiderata. Osservando i valori di potenza associati alle ore di accensione dell'impianto si può notare infatti come nel caso di Palermo siano superiori rispetto al caso di Milano. Ciò significa che la potenza fornita dall'impianto di riscaldamento per garantire la temperatura di set-point all'accensione dell'impianto è superiore rispetto al caso di Milano pur avendo temperature esterne più elevate.

Essendo l'impianto acceso per un minor numero di ore la differenza tra la struttura leggera e la struttura massiva è molto più evidente, sia dal punto di vista del decadimento che delle potenze fornite. Una maggiore differenza di temperatura operativa tra le due tipologie di strutture implica una maggiore differenza tra le potenze da fornire, inoltre essendo l'impianto acceso per poche ore non si raggiunge la situazione in cui le potenze associate alla struttura massiva e alla struttura leggera risultino simili tra loro, come si verifica nel caso di Milano.

4.10.2 Potenza Ridotta: Tempo di Ripresa della Temperatura Operativa a Seguito dell'Accensione dell'Impianto di Riscaldamento

In questa analisi l'impianto, nei momenti in cui risulterà acceso, fornirà ad ogni ora una potenza ridotta del 50% rispetto alla potenza massima utilizzata nella camera matrimoniale durante l'intero periodo invernale. Lo scopo sarà determinare quale struttura abbia un tempo di ripresa minore e l'andamento della temperatura operativa in presenza di un impianto che potrebbe fornire minore potenza di quella in realtà necessaria. Per ogni località l'analisi viene effettuata sul giorno caratterizzato dalle temperature esterne più basse durante l'interno periodo invernale.

4.10.2.1 Milano

Come nell'analisi precedente, l'impianto viene considerato acceso dalle ore 6:00 alle ore 13:00 e dalle ore 17:00 alle ore 24:00, il giorno caratterizzato dalle temperature esterne più basse risulta essere il 23 dicembre. L'intervallo temporale considerato per l'analisi va dalle ore 2:00 del giorno 23 dicembre alle ore 13:00 del giorno 24 dicembre. Nella tabella proposta di seguito sono riportate le temperature operative orarie associate alle due tipologie di strutture, con evidenziate le potenze fornite dall'impianto. Le righe della tabella caratterizzate dal colore verde segnalano l'accensione dell'impianto, mentre le righe caratterizzate dal colore celeste segnalano il suo spegnimento. Le caselle contrassegnate in giallo evidenziano l'ora in cui si raggiunge la temperatura di set-point prefissata, mentre i numeri contrassegnati in rosso evidenziano le ore in cui l'impianto risulta acceso ma la temperatura operativa non raggiunge la temperatura di set-point desiderata.

23 December (Milan)						
t	T_e	$T_{op,M}$	$T_{op,L}$	ΔT_{op}	$P_{H,M}$	$P_{H,L}$
[h]	[°C]	[°C]	[°C]	[-]	[W]	[W]
2:00	-0.2	19.1	18.8	0.3	0	0
3:00	-0.1	19	18.5	0.5	0	0
4:00	-0.3	18.8	18.2	0.6	0	0
5:00	-0.8	18.7	18	0.7	0	0
6:00	-1.4	**19.3**	**18.9**	0.4	**450**	**450**
7:00	-1.3	**19.5**	**19.2**	0.3	450	450
8:00	-1.6	**19.7**	**19.4**	0.3	450	450
9:00	-1.8	**19.8**	**19.5**	0.3	450	450
10:00	-1.2	20	**19.8**	0.2	450	450
11:00	-0.5	20	20	0	328	398
12:00	0.6	20	20	0	240	283
13:00	1.8	**20**	**20**	0	**153**	**187**
14:00	2	19.8	19.6	0.2	0	0
15:00	1.5	19.6	19.2	0.4	0	0
16:00	1.3	19.3	18.8	0.5	0	0
17:00	0.9	**19.8**	**19.6**	0.2	**450**	**450**
18:00	0.5	20	**19.8**	0.2	450	450
19:00	0.6	20	20	0	419	450
20:00	1.1	20	20	0	385	401
21:00	1.1	20	20	0	373	385
22:00	0.8	20	20	0	370	379
23:00	0.5	20	20	0	368	376
0:00	0.3	**20**	**20**	0	**366**	**373**
1:00	0.6	19.4	19.1	0.3	0	0
2:00	1.1	19.1	18.7	0.4	0	0
3:00	0.9	19	18.4	0.6	0	0
4:00	0.5	18.8	18.2	0.6	0	0
5:00	0	18.7	17.9	0.8	0	0
6:00	-0.2	**19.3**	**18.8**	0.5	**450**	**450**
7:00	-0.5	**19.5**	**19.1**	0.4	450	450
8:00	-0.6	**19.7**	**19.3**	0.4	450	450
9:00	-0.4	**19.8**	**19.5**	0.3	450	450
10:00	0.2	20	**19.8**	0.2	450	450
11:00	1.7	20	20	0	312	393
12:00	2.5	20	20	0	244	289
13:00	2.9	**20**	**20**	0	**158**	**189**
$T_{op,min}$		18.7	17.9	0.8		

Tabella 61: Temperature Operative e Potenze Fornite dall'Impianto in Funzione della Tipologia di Struttura (Milano)

Attraverso questi dati è possibile realizzare un grafico riportante per ogni ora la temperatura operativa e la potenza fornita dall'impianto (nelle ore in cui risulta acceso) associate alle due tipologie di strutture, in relazione alla temperatura esterna.

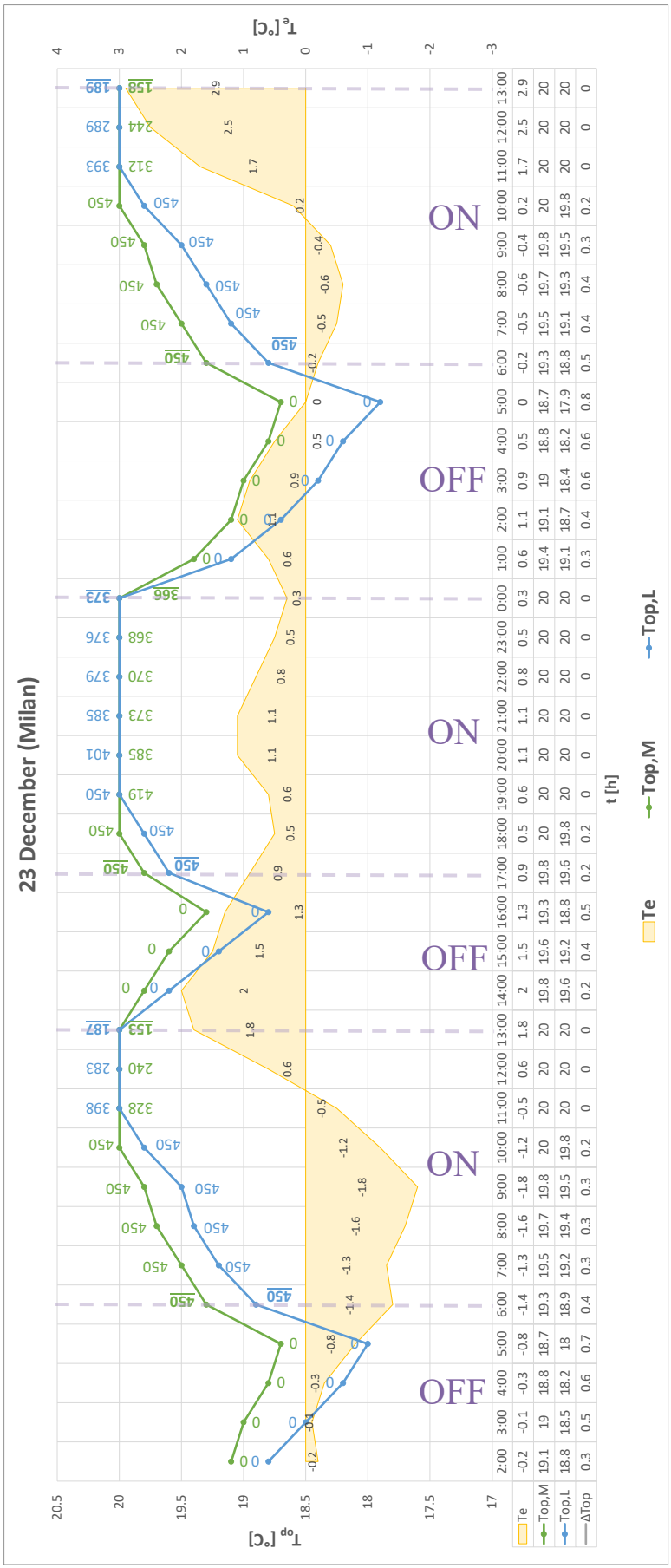

Grafico 82: Ripresa della Temperatura Operativa a Seguito dell'Accensione dell'Impianto in Funzione della Tipologia di Struttura, i Numeri Indicano la Potenza Fornita dall'Impianto per Garantire una Temperatura Operativa pari a 20°C (Milano)

È possibile notare come non fornendo sempre la massima potenza possibile non si riesca a raggiungere la temperatura di set-point nell'ora di accensione dell'impianto, quindi a differenza dell'analisi precedente sono presenti delle ore dove l'impianto è acceso ma la temperatura non raggiunge i 20°C. Ciò significa che l'impianto impiegherà del tempo per portare l'ambiente alla temperatura di regime. Inoltre è possibile notare come all'aumentare delle ore in cui l'impianto è spento, le strutture impiegano un maggior tempo a raggiungere la temperatura di set-point, infatti la mattina l'impianto impiegherà più ore rispetto al pomeriggio per far raggiungere all'ambiente la temperatura di 20°C. Questo è dovuto al fatto che, come visto in precedenza, se un impianto viene spento per un maggior numero di ore allora sarà maggiore il decadimento di temperatura, più la temperatura operativa risulterà bassa e più tempo occorrerà per aumentarla e quindi portarla nuovamente alla temperatura di set-point.

Confrontando l'andamento della temperatura operativa associata alle due tipologie di strutture si nota come la struttura massiva riesca a raggiungere la temperatura di set-point sempre un'ora prima rispetto alla struttura leggera, questo è dovuto al fatto che essendo maggiore il decadimento di temperatura nella struttura leggera l'impianto impiegherà più tempo per innalzare la temperatura operativa.

In conclusione, utilizzando un impianto che non fornisce ad ogni ora la massima potenza necessaria, non si raggiunge in corrispondenza dell'accensione dell'impianto la temperatura di set-point, inoltre il tempo di ripresa risulta maggiore tanto più bassa risulta la temperatura operativa prima dell'accensione dell'impianto.

4.10.2.2 Roma

Come nell'analisi precedente, l'impianto viene considerato acceso dalle ore 6:00 alle ore 12:00 e dalle ore 18:00 alle ore 24:00, il giorno caratterizzato dalle temperature esterne più basse risulta essere il 14 febbraio. L'intervallo temporale considerato per l'analisi va dalle ore 2:00 del giorno 14 febbraio alle ore 12:00 del giorno 15 febbraio. Nella tabella proposta di seguito sono riportate le temperature operative orarie associate alle due tipologie di strutture, con evidenziate le potenze fornite dall'impianto. Le righe della tabella caratterizzate dal colore verde segnalano l'accensione dell'impianto, mentre le righe caratterizzate dal colore celeste segnalano il suo spegnimento. Le caselle contrassegnate in giallo evidenziano l'ora in cui si raggiunge la temperatura di set-point prefissata, mentre i numeri contrassegnati in rosso evidenziano le ore in cui l'impianto risulta acceso ma la temperatura operativa non raggiunge la temperatura di set-point desiderata.

14 February (Rome)						
t	T_e	$T_{op,M}$	$T_{op,L}$	ΔT_{op}	$P_{H,M}$	$P_{H,L}$
[h]	[°C]	[°C]	[°C]	[-]	[W]	[W]
2:00	1.6	19.5	19.4	0.1	0	0
3:00	1.5	19.4	19.2	0.2	0	0
4:00	0.6	19.3	18.9	0.4	0	0
5:00	-0.1	19.1	18.7	0.4	0	0
6:00	0.3	**19.7**	**19.3**	0.4	**350**	**350**
7:00	0.1	20	**19.6**	0.4	350	350
8:00	1.4	20	20	0	63	243
9:00	3.3	20.3	20.1	0.2	0	0
10:00	6.1	20.7	20.5	0.2	0	0
11:00	8.1	21.1	21	0.1	0	0
12:00	9.9	**21.5**	**21.4**	0.1	**0**	**0**
13:00	11.2	21.9	22	-0.1	0	0
14:00	11.9	22.1	22.3	-0.2	0	0
15:00	11.7	22	22.3	-0.3	0	0
16:00	11.1	21.7	22	-0.3	0	0
17:00	10.7	21.2	21.5	-0.3	0	0
18:00	9.7	**20.9**	**21.1**	-0.2	**0**	**0**
19:00	9.3	20.6	20.9	-0.3	0	0
20:00	8.3	20.5	20.7	-0.2	0	0
21:00	7.1	20.3	20.5	-0.2	0	0
22:00	5.7	20.1	20.3	-0.2	0	0
23:00	4.8	20	20.1	-0.1	24	0
0:00	3.8	**20**	**20**	0	**90**	**60**
1:00	3.5	19.8	19.7	0.1	0	0
2:00	3.4	19.6	19.5	0.1	0	0
3:00	2.3	19.5	19.3	0.2	0	0
4:00	1.5	19.4	19.1	0.3	0	0
5:00	2.2	19.3	18.9	0.4	0	0
6:00	2.5	**19.9**	**19.6**	0.3	**350**	**350**
7:00	2.5	20	19.8	0.2	286	350
8:00	3.8	20	20	0	158	287
9:00	4.4	20	20	0	65	170
10:00	6.7	20.2	20	0.2	0	9
11:00	10.5	20.8	20.6	0.2	0	0
12:00	12.3	**21.1**	**21**	0.1	**0**	**0**
$T_{op,min}$		19.1	18.7	0.4		

Tabella 62: Temperature Operative e Potenze Fornite dall'Impianto in Funzione della Tipologia di Struttura (Roma)

Attraverso questi dati è possibile realizzare un grafico riportante per ogni ora la temperatura operativa e la potenza fornita dall'impianto (nelle ore in cui risulta acceso) associate alle due tipologie di strutture, in relazione alla temperatura esterna.

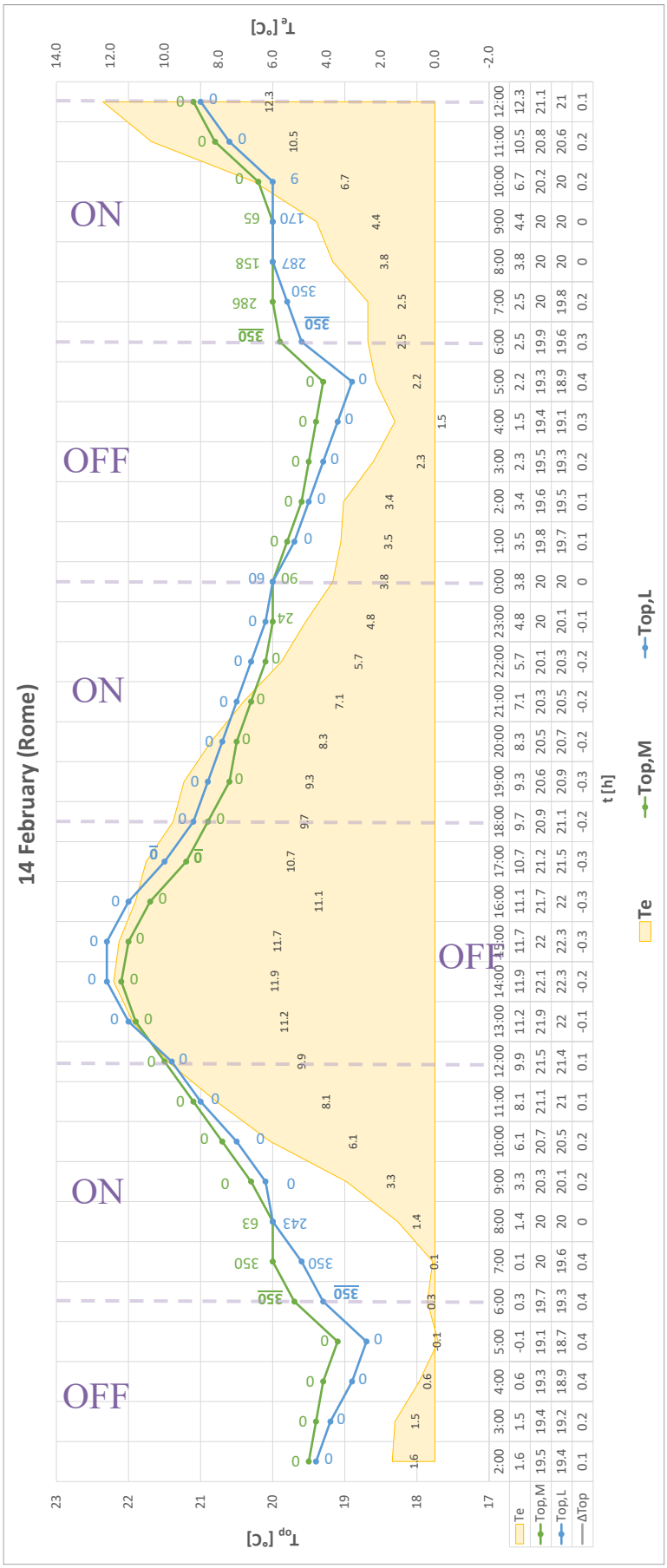

Grafico 83: Ripresa della Temperatura Operativa a Seguito dell'Accensione dell'Impianto in Funzione della Tipologia di Struttura, i Numeri Indicano la Potenza Fornita dall'Impianto per Garantire una Temperatura Operativa pari a 20°C (Roma 1)

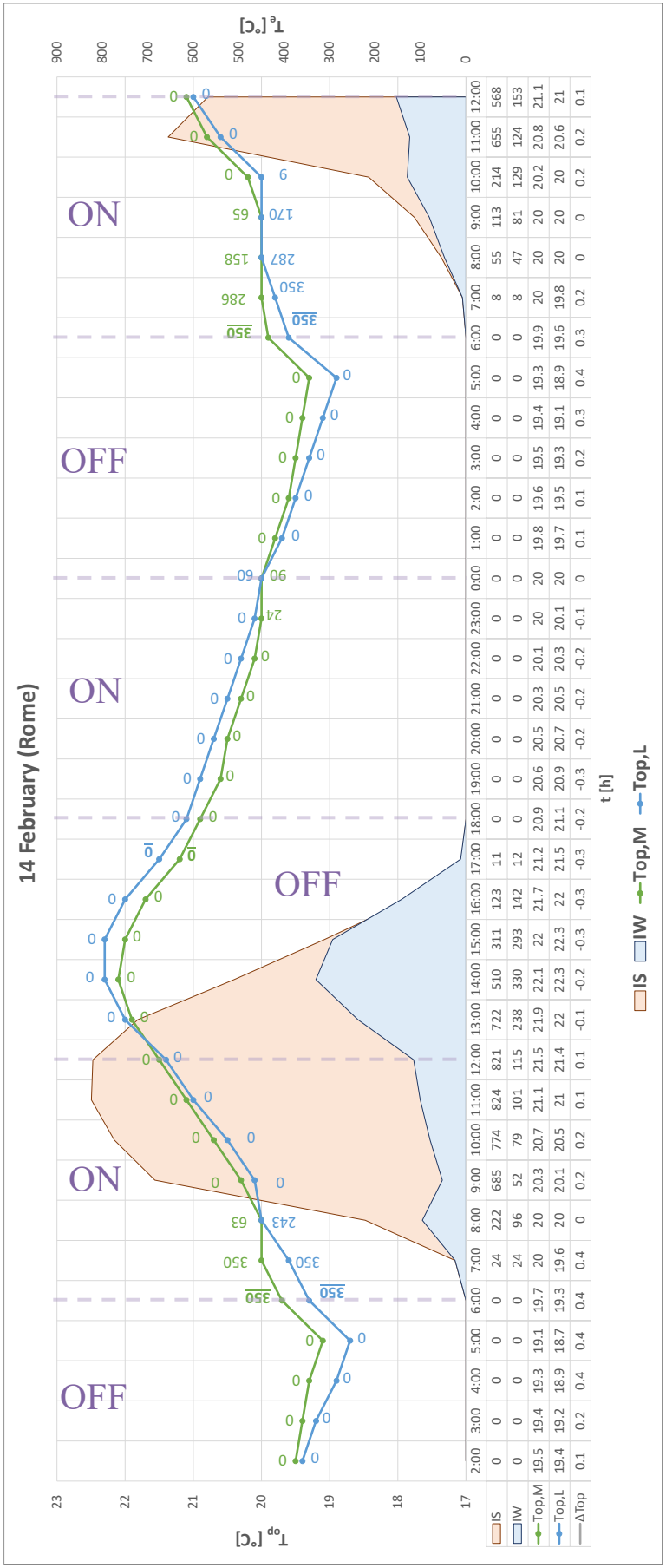

Grafico 84: Ripresa della Temperatura Operativa a Seguito dell'Accensione dell'Impianto in Funzione della Tipologia di Struttura, i Numeri Indicano la Potenza Fornita dall'Impianto per Garantire una Temperatura Operativa pari a 20°C (Roma 2)

Come nel caso di Milano, seppur in modo meno evidente a causa della radiazione solare, fornendo una potenza ridotta non si riesce a raggiungere la temperatura di set-point nell'ora di accensione dell'impianto, ma solo nelle successive. Di nuovo però la presenza della radiazione solare rende le ore di accensione dell'impianto eccessive rispetto alle ore realmente necessarie. Essendo le temperature operative elevate grazie alla radiazione solare, avere un impianto a potenza ridotta incide in maniera molto meno significativa nella località di Roma rispetto alla località di Milano.

4.10.2.3 Palermo

Come nell'analisi precedente, l'impianto viene considerato acceso dalle ore 7:00 alle ore 11:00 e dalle ore 19:00 alle ore 23:00, il giorno caratterizzato dalle temperature esterne più basse risulta essere il 23 gennaio. L'intervallo temporale considerato per l'analisi va dalle ore 2:00 del giorno 23 gennaio alle ore 11:00 del giorno 24 gennaio. Nella tabella proposta di seguito sono riportate le temperature operative orarie associate alle due tipologie di strutture, con evidenziate le potenze fornite dall'impianto. Le righe della tabella caratterizzate dal colore verde segnalano l'accensione dell'impianto, mentre le righe caratterizzate dal colore celeste segnalano il suo spegnimento. Le caselle contrassegnate in giallo evidenziano l'ora in cui si raggiunge la temperatura di set-point prefissata, mentre i numeri contrassegnati in rosso evidenziano le ore in cui l'impianto risulta acceso ma la temperatura operativa non raggiunge la temperatura di set-point desiderata.

23 January (Palermo)						
t	T_e	$T_{op,M}$	$T_{op,L}$	ΔT_{op}	$P_{H,M}$	$P_{H,L}$
[h]	[°C]	[°C]	[°C]	[-]	[W]	[W]
2:00	6.3	19.1	18.4	0.7	0	0
3:00	4.8	19	18	1	0	0
4:00	3.9	18.8	17.7	1.1	0	0
5:00	3.5	18.7	17.5	1.2	0	0
6:00	3.8	18.6	17.3	1.3	0	0
7:00	4.1	**19.4**	**18.4**	1	**550**	**550**
8:00	6.4	**19.9**	**19**	0.9	550	550
9:00	7.9	20	**19.5**	0.5	412	550
10:00	8.5	20	**19.9**	0.1	315	550
11:00	9.1	**20**	**20**	0	**209**	**421**
12:00	9.2	19.7	19.1	0.6	0	0
13:00	8.7	19.5	18.7	0.8	0	0
14:00	8.4	19.3	18.4	0.9	0	0
15:00	8.4	19.2	18.2	1	0	0
16:00	7.6	19	18	1	0	0
17:00	6.8	18.9	17.7	1.2	0	0
18:00	6.4	18.8	17.5	1.3	0	0
19:00	6.0	**19.5**	**18.7**	0.8	**550**	**550**
20:00	6.5	**19.8**	**19.1**	0.7	550	550
21:00	6.8	20	**19.4**	0.6	522	550
22:00	7.0	20	**19.6**	0.4	443	550
23:00	7.1	**20**	**19.7**	0.3	**410**	**550**
0:00	7.1	19.4	18.5	0.9	0	0
1:00	6.8	19.1	18	1.1	0	0
2:00	6.7	18.9	17.7	1.2	0	0
3:00	5.6	18.8	17.4	1.4	0	0
4:00	6.0	18.7	17.2	1.5	0	0
5:00	6.3	18.6	17	1.6	0	0
6:00	7.5	18.5	16.9	1.6	0	0
7:00	7.1	**19.3**	**18.1**	1.2	**550**	**550**
8:00	7.6	**19.8**	**18.8**	1	550	550
9:00	8.6	20	**19.4**	0.6	449	550
10:00	8.9	20	**19.9**	0.1	279	550
11:00	9.0	**20**	**20**	0	**244**	**431**
$T_{op,min}$		18.5	16.9	1.6		

Tabella 63: Temperature Operative e Potenze Fornite dall'Impianto in Funzione della Tipologia di Struttura (Palermo)

Attraverso questi dati è possibile realizzare un grafico riportante per ogni ora la temperatura operativa e la potenza fornita dall'impianto (nelle ore in cui risulta acceso) associate alle due tipologie di strutture, in relazione alla temperatura esterna.

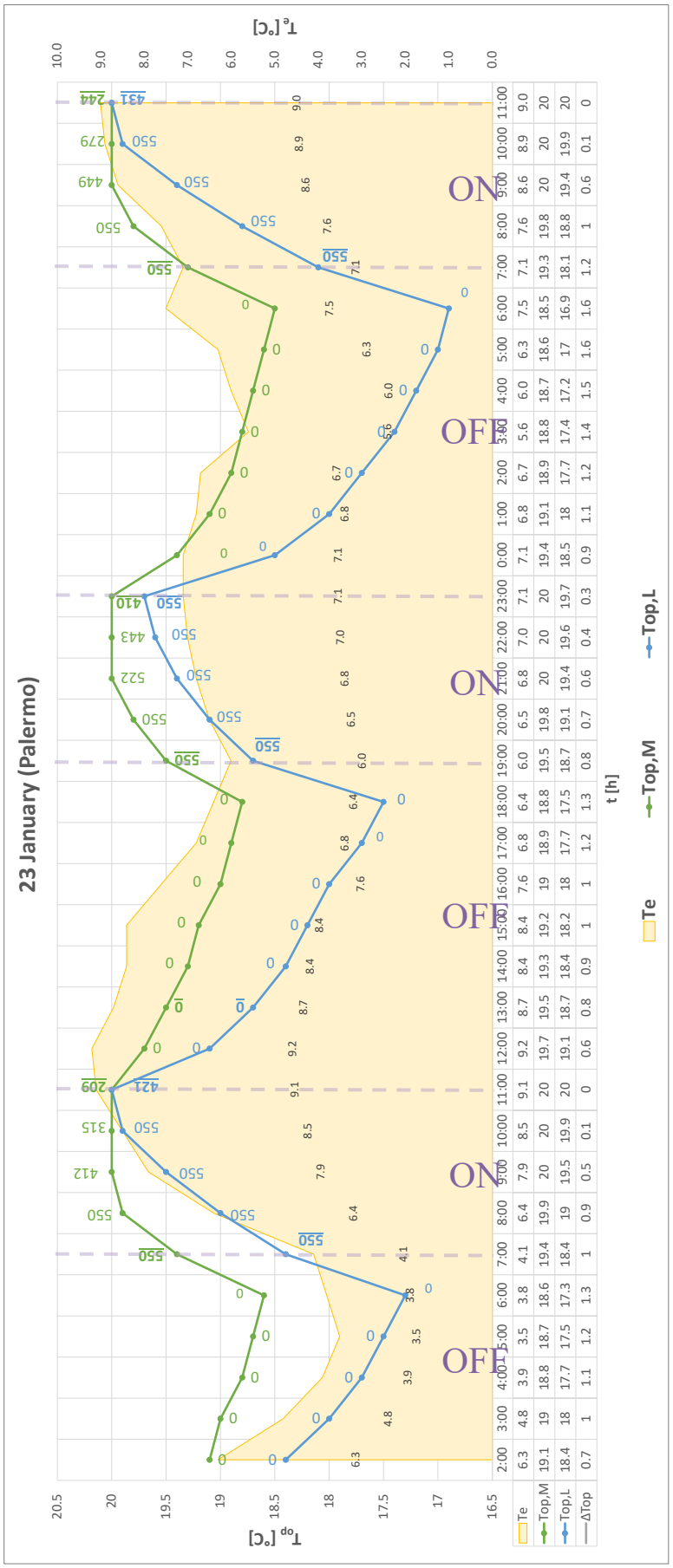

Grafico 85: Ripresa della Temperatura Operativa a Seguito dell'Accensione dell'Impianto in Funzione della Tipologia di Struttura, i Numeri Indicano la Potenza Fornita dall'Impianto per Garantire una Temperatura Operativa pari a 20°C (Palermo)

Come nel caso di Milano è possibile notare che fornendo una potenza ridotta non si riesce a raggiungere la temperatura di set-point nell'ora di accensione dell'impianto. Rispetto a Milano vi è un diverso andamento della temperatura operativa associata alle due tipologie di strutture che, come visto nell'analisi precedente, è dato dal minor numero di ore di accensione dell'impianto e dalle trasmittanze termiche dell'involucro più elevate. La struttura massiva raggiunge due ore prima la temperatura di set-point rispetto alla struttura leggera, inoltre quest'ultima durante l'accensione serale non riesce a raggiungere la temperatura di set-point prima dello spegnimento notturno dell'impianto. Ciò è dovuto al maggior decadimento della temperatura operativa associata alla struttura leggera rispetto alla struttura massiva.

In conclusione, utilizzando un impianto che non fornisce ad ogni ora la massima potenza necessaria, non si raggiunge in corrispondenza dell'accensione dell'impianto la temperatura di set-point, inoltre il tempo di ripresa risulta maggiore tanto più bassa risulta la temperatura operativa prima dell'accensione dell'impianto.

4.10.2.4 Conclusioni

Fissata la tipologia di struttura, il decadimento della temperatura operativa varierà in funzione dei dati climatici e delle ore in cui l'impianto risulta spento. In generale, un maggior numero di ore in cui l'impianto è spento implica un maggiore decadimento della temperatura che inciderà sulla potenza da fornire per raggiungere la temperatura di set-point desiderata. Più è bassa la temperatura operativa e maggiore potenza dovrà fornire l'impianto affinché si garantisca la temperatura prefissata. Il tempo di ripresa è quindi influenzato dal valore dalla temperatura operativa assunto prima dell'accensione dell'impianto e della potenza dello stesso, se la temperatura è molto bassa e la potenza non è sufficiente il tempo di ripresa sarà molto elevato. La condizione migliore è associata a temperature operative elevate, ottenibili realizzando un edificio inerziale che possa accumulare calore durante le ore di accensione dell'impianto, per poi rilasciarlo nelle ore notturne, in modo tale da evitare decadimenti elevati della temperatura operativa e quindi garantire un tempo di ripresa ridotto utilizzando un impianto di potenza contenuta.

4.10.3 Fattori di Carico in Funzione della Potenza Fornita dall'Impianto di Riscaldamento

Per ogni località verranno riportati i medesimi grafici precedentemente studiati, dove in corrispondenza delle temperature operative non verrà riportata la potenza fornita dall'impianto ma bensì il fattore di carico a cui lavorerà il generatore. Il fattore di carico, associato ad una certa ora, è dato dal rapporto tra la potenza fornita dal generatore in quell'ora e la massima potenza che esso è in grado di fornire. Per il calcolo del fattore di carico nel caso di potenza infinita si è scelta come potenza massima la massima potenza fornita dall'impianto nell'intervallo di tempo considerato, mentre nel caso di potenza ridotta come massima potenza è stata scelta la potenza massima che effettivamente l'impianto può fornire.

4.10.3.1 Milano, Roma, Palermo

Osservando i grafici riportati di seguito, è possibile notare come per ogni località studiata nel caso di potenza infinita i fattori di carico risultino meno elevati rispetto ai fattori di carico riportati nel caso di potenza ridotta. Nel caso di potenza infinita, le potenze più elevate si trovano solo in corrispondenza della prima ora di accensione dell'impianto, poiché tali potenze sono necessarie affinché la temperatura operativa raggiunga nella stessa ora di accensione la temperatura di set-point desiderata. Di conseguenza la potenza necessaria nelle ore successive per mantenere la temperatura operativa a 20°C diminuirà, portando quindi ad una riduzione dei fattori di carico. Nel caso di potenza ridotta invece, non si raggiunge il valore di set-point nell'ora di accensione dell'impianto ma solo nelle ore successive, questo significa che l'impianto dovrà continuare a fornire la potenza massima per un maggior numero di ore e ciò implica fattori di carico più elevati.

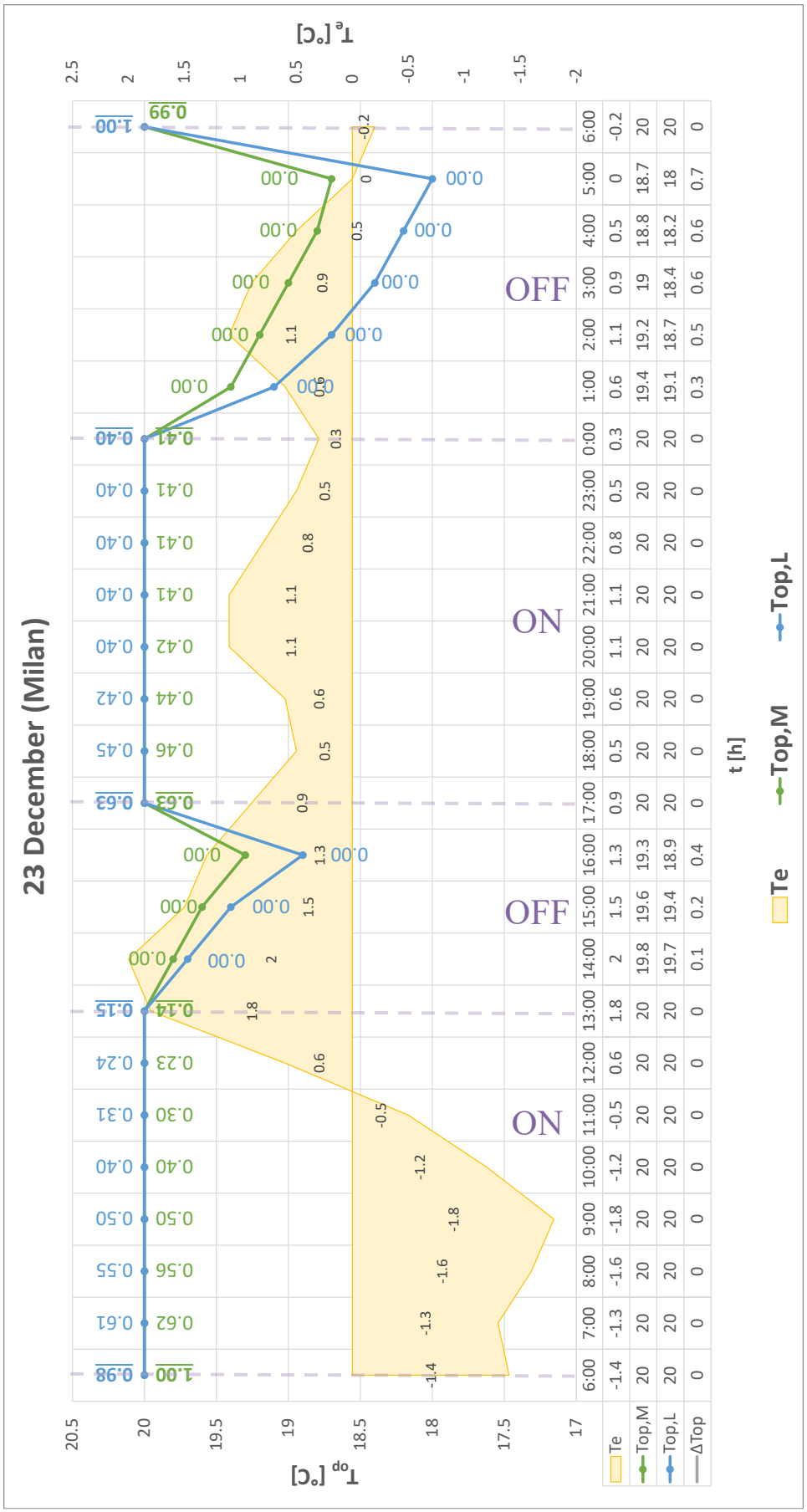

Grafico 86: Variazione della Temperatura Operativa Causata dall'Intermittenza dell'Impianto in Funzione della Tipologia di Struttura, i Numeri Indicano il Fattore di Carico a Cui Lavora il Generatore (Milano, Potenza Infinita)

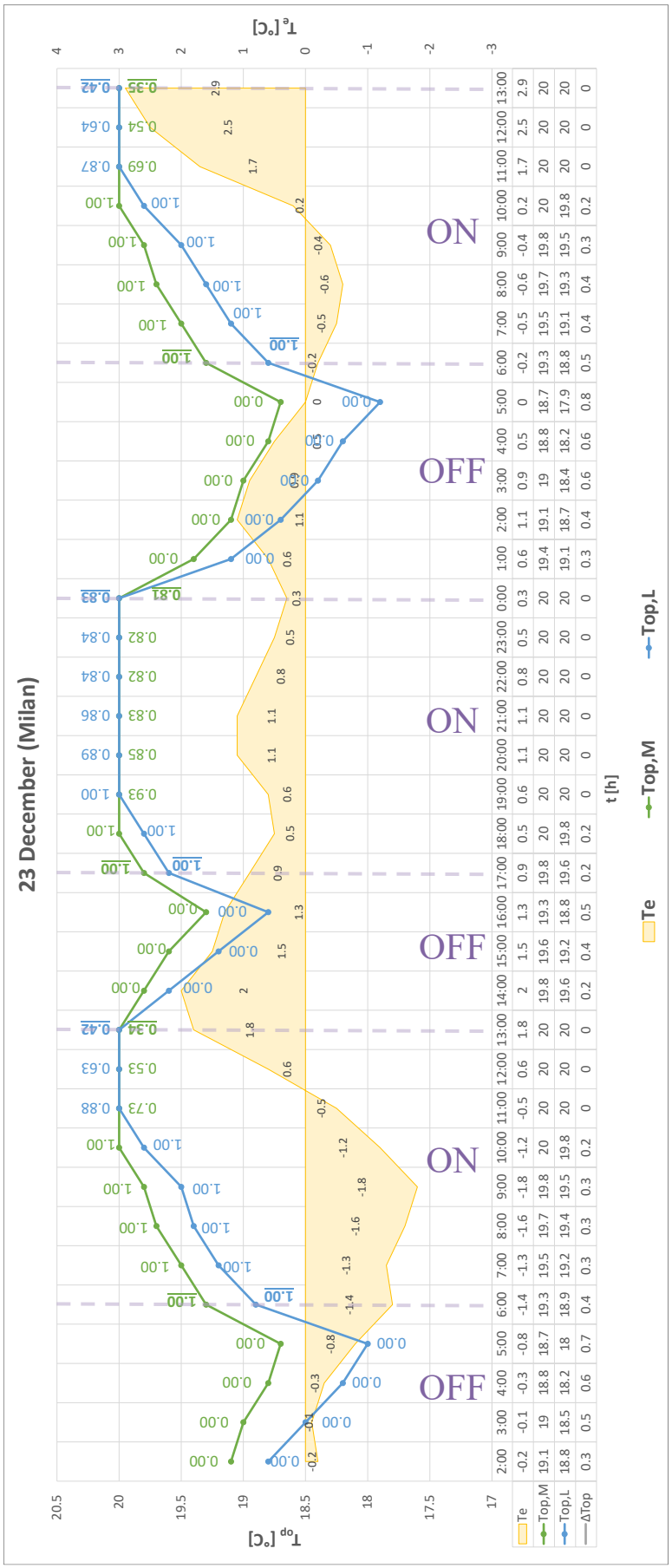

Grafico 87: Variazione della Temperatura Operativa Causata dall'Intermittenza dell'Impianto in Funzione della Tipologia di Struttura, i Numeri Indicano il Fattore di Carico a Cui Lavora il Generatore (Milano, Potenza Ridotta)

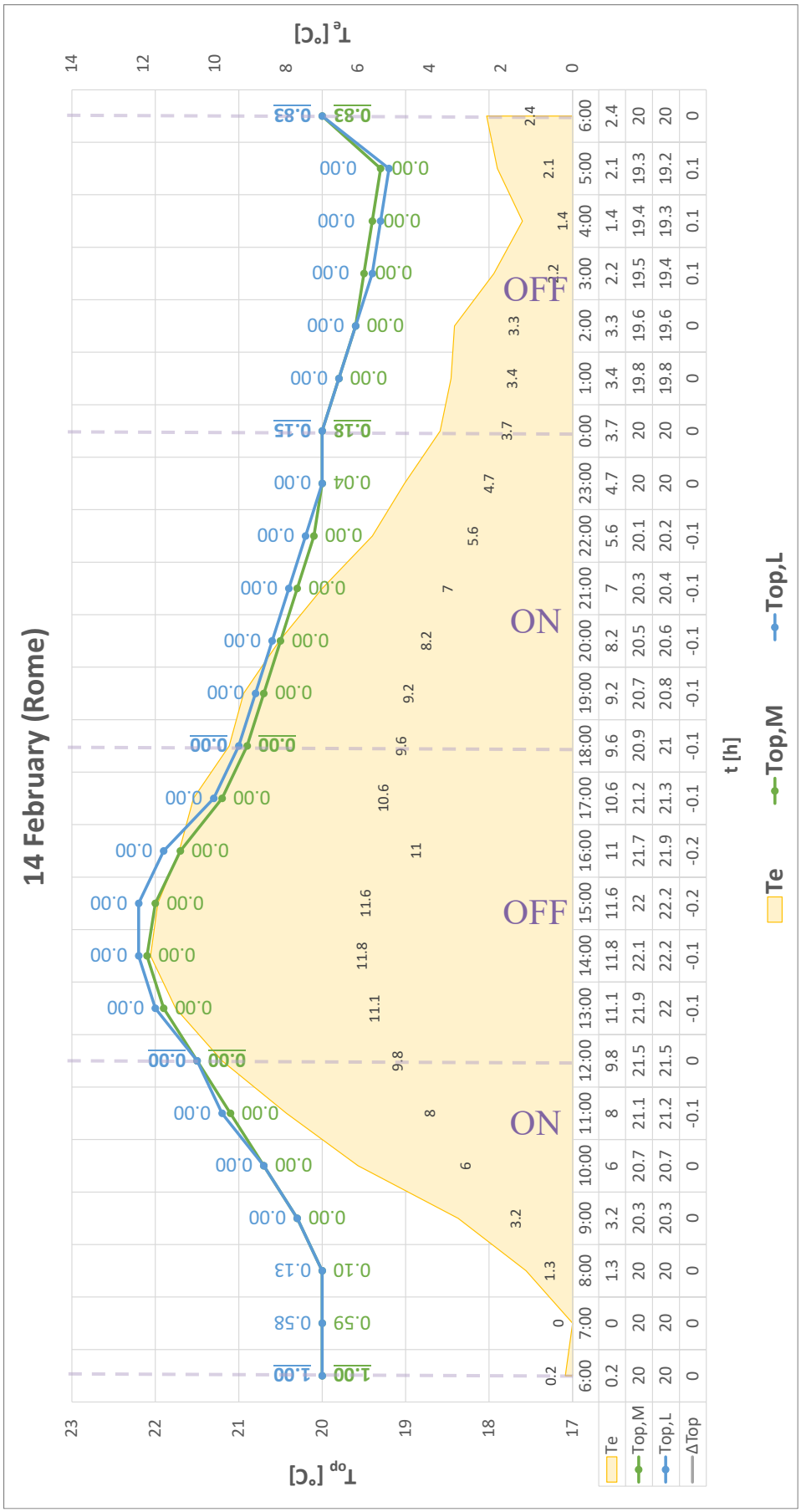

Grafico 88: Variazione della Temperatura Operativa Causata dall'Intermittenza dell'Impianto in Funzione della Tipologia di Struttura, i Numeri Indicano il Fattore di Carico a Cui Lavora il Generatore (Roma, Potenza Infinita)

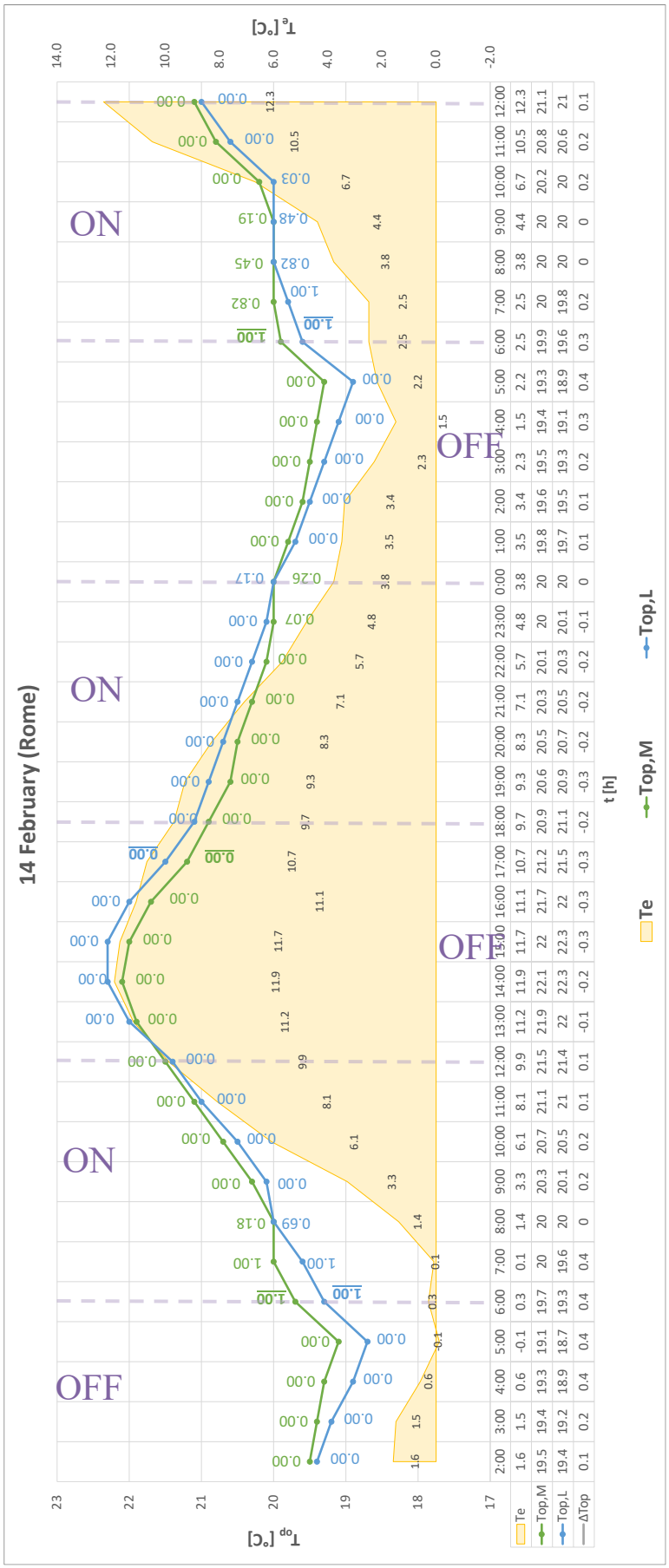

Grafico 89: Variazione della Temperatura Operativa Causata dall'Intermittenza dell'Impianto in Funzione della Tipologia di Struttura, i Numeri Indicano il Fattore di Carico a Cui Lavora il Generatore (Roma, Potenza Ridotta)

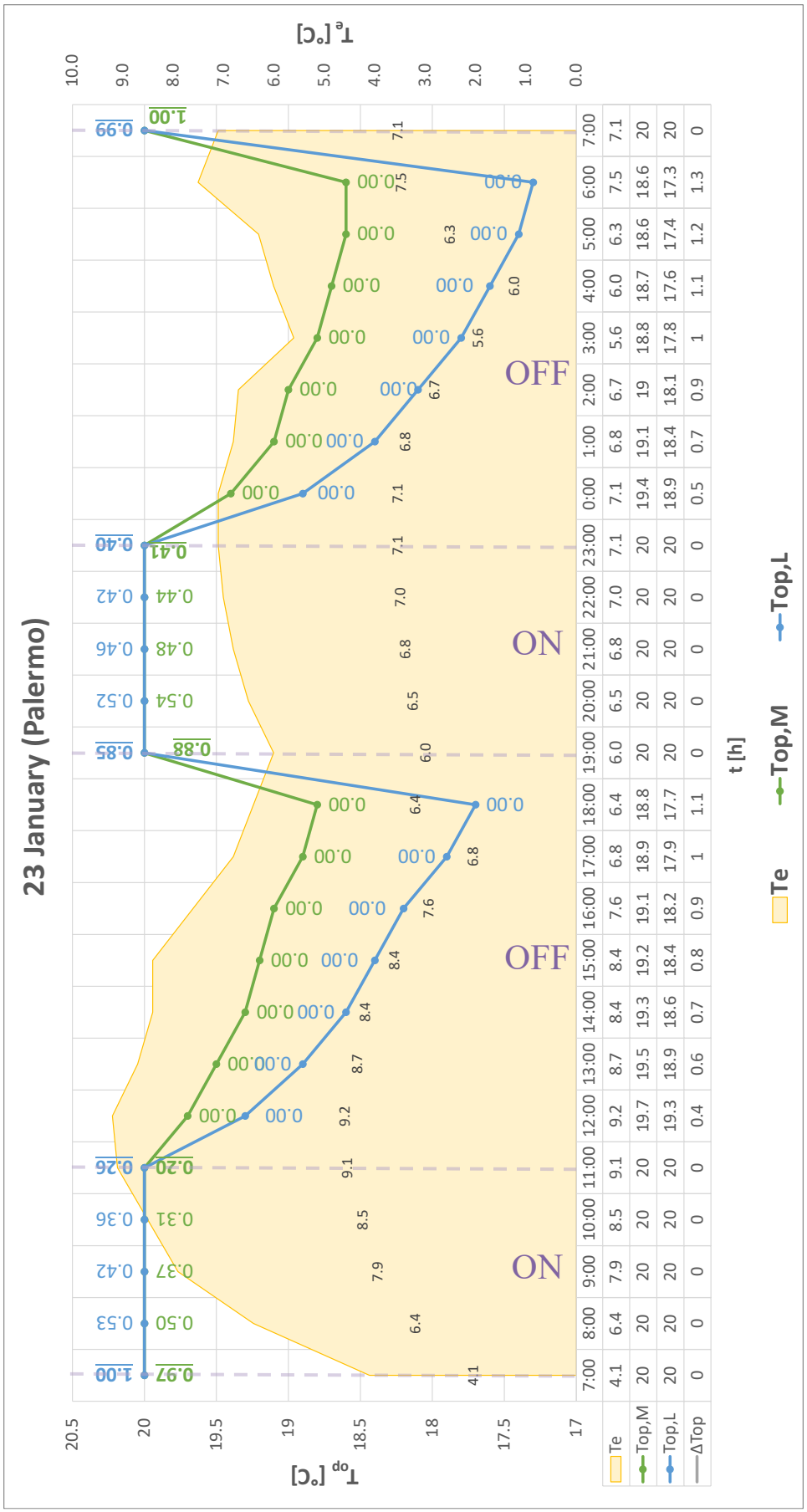

Grafico 90: Variazione della Temperatura Operativa Causata dall'Intermittenza dell'Impianto in Funzione della Tipologia di Struttura, i Numeri Indicano il Fattore di Carico a Cui Lavora il Generatore (Palermo, Potenza Infinita)

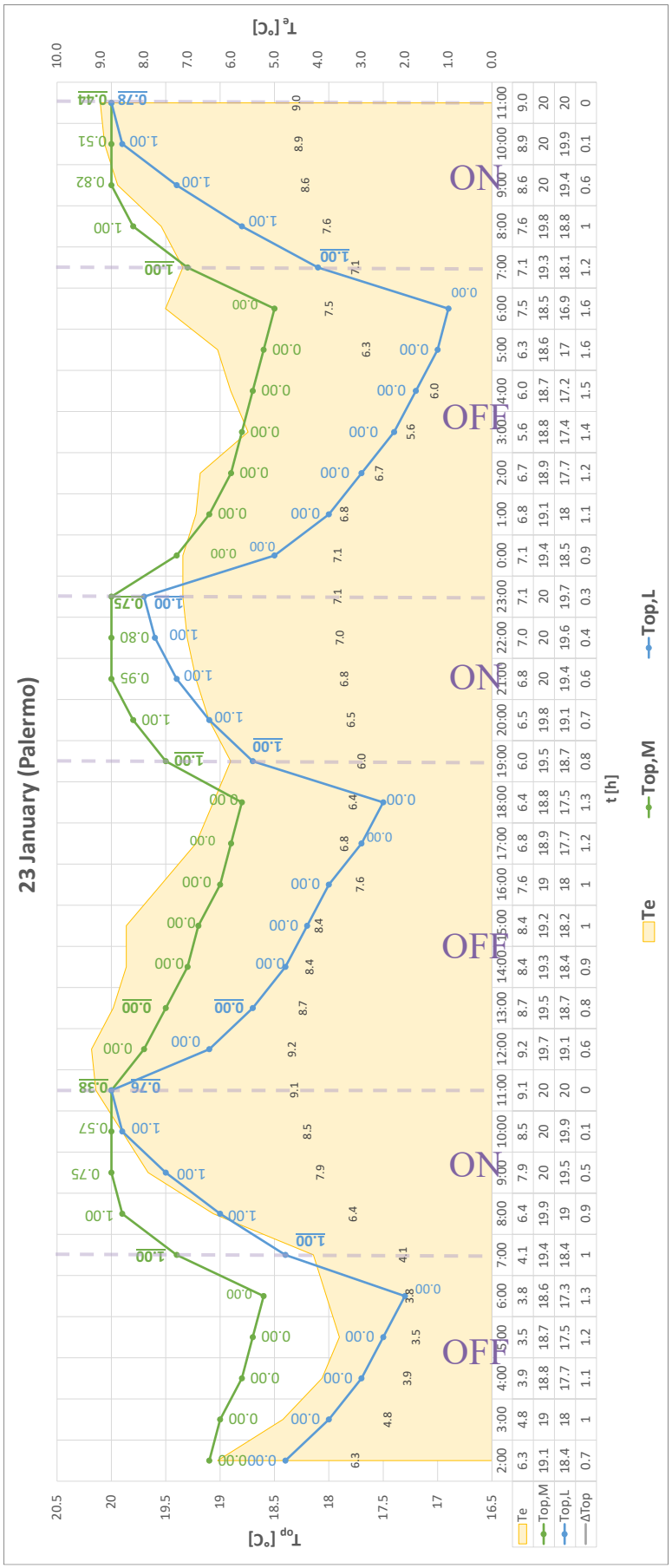

Grafico 91: Variazione della Temperatura Operativa Causata dall'Intermittenza dell'Impianto in Funzione della Tipologia di Struttura, i Numeri Indicano il Fattore di Carico a Cui Lavora il Generatore (Palermo, Potenza Ridotta)

4.10.3.2 Conclusioni

Nel caso di potenza infinita, le potenze associate alle varie ore di accensione sono molto minori rispetto alla potenza massima utilizzata nella prima ora di accensione dell'impianto, questo comporta fattori di carico meno elevati. Nel caso di potenza ridotta invece, essendo la potenza massima impiegata non sufficiente a garantire nell'ora di accensione la temperatura di set-point, il generatore continuerà a fornire la potenza massima anche nelle ore successive, lavorando a fattori di carico più elevati per un maggior numero di ore.

5. Analisi Risultati: Metodo Semi Stazionario UNI TS 11300-1

5.1 Valutazione della Costante di Tempo in Funzione della Tipologia di Struttura (Massiva e Leggera), dei Ricambi di Aria e dell'Isolamento del Solaio di Sottotetto

In questo paragrafo verrà tratta l'analisi della costante di tempo, associata al caso studio 2 e al caso studio 3, calcolata secondo la norma UNI EN ISO 13790. La costante di tempo di una zona termica, espressa in ore, è una grandezza che caratterizza l'inerzia termica della zona considerata, sia per il periodo di riscaldamento che di raffrescamento. Essa è espressa come il rapporto tra la capacità termica interna C_m della zona termica e il coefficiente globale di scambio termico, dato dalla somma dei coefficienti di scambio termico per trasmissione $H_{tr,adj}$ e per ventilazione $H_{ve,adj}$, espressi entrambi in [W/K]:

$$\tau = \frac{C_m}{(H_{tr,adj}+H_{ve,adj})*3600}$$ (Equazione 62 UNI EN ISO 13790)

La capacità termica interna C_m [K/J] viene calcolata mediante la seguente equazione:

$$C_m = \sum_j k_j * A_j$$ (Equazione 66 UNI EN ISO 13790)

Dove k_j è la capacità termica interna areica dell'elemento j-esimo della zona termica considerata, espressa in [J/m^{2}K] e calcolata mediante la norma ISO 13786, mentre A_j è l'area dell'elemento j-esimo costituente la zona termica considerata. La capacità termica interna tiene conto del calore specifico e della massa dei componenti della zona termica, il coefficiente di scambio termico per trasmissione viene calcolato considerando il valore di trasmittanza termica e la superficie disperdente degli elementi costituenti la zona termica, mentre il coefficiente di scambio termico per ventilazione tiene conto dei ricambi d'aria, della frazione di recupero del calore e del volume netto interno. La costante di tempo è quindi un parametro relativo all'involucro che indica la risposta dell'edificio al variare delle condizioni esterne e al funzionamento dell'impianto termico, tanto più è elevata la costante di tempo e tanto più tempo occorrerà per variare le condizioni all'interno dell'edificio, a prescindere che questa variazione sia determinata da eventi meteorologici esterni o dettata dall'impianto termico.

Una prima analisi consisterà nella valutazione dell'incidenza della capacità termica interna e del coefficiente di scambio termico per ventilazione sulla costante di tempo, in particolare si andrà ad osservare la variazione della costante di tempo in funzione del cambiamento di struttura (massiva o leggera) e dei ricambi d'aria. Le costanti di tempo determinate sono associate al piano terra e al piano primo degli edifici oggetto di studio e non all'intero edificio. Ciò è stato effettuato per poter studiare in una seconda analisi anche l'incidenza dell'isolamento del solaio di sottotetto sulla costante di tempo, poiché solo il primo piano risentirà del cambiamento della tipologia di solaio tra il caso studio 2 e il caso studio 3. Considerando come zone termiche i due piani piuttosto che l'edificio nel suo insieme sarà possibile quindi evidenziare in modo più dettagliato l'incidenza della tipologia di solaio sulla costante di tempo. Le analisi proposte verranno estese a tutte le località considerate precedentemente.

Gli elementi che costituiscono l'involucro della zona termica sono caratterizzati da capacità termica interna areica k_j diversa (gli elementi massivi avranno una capacità termica interna più elevata rispetto agli elementi leggeri), mentre la trasmittanza termica si mantiene circa costante tra una tipologia di struttura e l'altra. Di conseguenza la variazione di struttura, da massiva a leggera, comporterà un cambiamento della capacità termica interna C_m e un coefficiente di scambio termico per trasmissione $H_{tr,adj}$ circa costante tra le due tipologie di strutture.

Un altro parametro su cui si andrà ad intervenire saranno i ricambi di aria, considerando nel primo caso un n pari a 0,50 [1/h] e nel secondo caso un n pari a 0,10 [1/h]. La variazione di n inciderà solo sul coefficiente di scambio termico per ventilazione $H_{ve,adj}$, in particolare all'aumentare di n aumenterà anche $H_{ve,adj.}$.

Alla luce di quanto evidenziato, nella prima analisi i parametri che andranno maggiormente ad influenzare la costante di tempo saranno la capacità termica interna e il coefficiente di scambio termico per la ventilazione, poiché tra la struttura massiva e la struttura leggera il coefficiente di scambio termico per trasmissione risulta circa costante, mentre nella seconda analisi il parametro che andrà ad influenzare la costante di tempo sarà il coefficiente di scambio termico per trasmissione, poiché variando la tipologia di solaio di sottotetto (da isolato a non isolato) varierà anche la trasmittanza termica e quindi $H_{tr,adj}$. Lo scopo in entrambe le analisi sarà determinare quale variazione dei suddetti parametri avrà un maggior peso sulla costante di tempo.

5.1.1 Analisi 1: Valutazione della Costante di Tempo in Funzione della Capacità Termica Interna e del Coefficiente di Scambio per la Ventilazione

In questa prima analisi si andrà ad analizzare la variazione della costante di tempo associata al piano terra e al primo piano al variare dalla capacità termica interna e del coefficiente di scambio termico per ventilazione. L'analisi verrà realizzata per il caso studio 2 (edificio dotato di sottotetto isolato e copertura non isolata) e per il caso studio 3 (edificio dotato di sottotetto non isolato e copertura isolata). Per ogni località saranno riportate delle tabelle contenenti le capacità termiche interne areiche degli elementi di involucro costituenti le due zone termiche, ovvero il piano terra e il primo piano, per entrambi i casi studio.

5.1.1.1 Milano

Areal Internal Heat Capacity k_J [kJ/m^{2}K] (Ground Floor)			
Case Study 2 / Case Study 3			
	Massive Structure	Lightweight Structure	Percentage Increase %
External Wall	34.56	21.56	60.29%
Internal Wall	50.99	30.50	67.18%
Internal Floor	77.37	78.48	-1.42%
Ground Floor	62.66	62.66	0.00%
Consequence	$> C_{m,M}$	$< C_{m,L}$	$\mathbf{C_{m,M} > C_{m,L}}$

Tabella 64: Milano, Capacità Termica Interna Areica degli Elementi di Involucro (Piano Terra)

Areal Internal Heat Capacity k_J [kJ/m^{2}K] (First Floor)			
Case Study 2			
	Massive Structure	Lightweight Structure	Percentage Increase %
External Wall	34.56	21.56	60.29%
Internal Wall	50.99	30.50	67.18%
Internal Floor	77.37	78.48	-1.42%
Sub-Roofing Floor (Isolated)	58.05	5.96	873.57%
Consequence	$>>> C_{m,M}$	$<<< C_{m,L}$	$\mathbf{C_{m,M} >>> C_{m,L}}$
Case Study 3			
	Massive Structure	Lightweight Structure	Percentage Increase %
External Wall	34.56	21.56	60.29%
Internal Wall	50.99	30.50	67.18%
Internal Floor	77.37	78.48	-1.42%
Sub-Roofing Floor (Not Isolated)	32.52	7.54	331.41%
Consequence	$>> C_{m,M}$	$<< C_{m,L}$	$\mathbf{C_{m,M} >> C_{m,L}}$

Tabella 65: Milano, Capacità Termica Interna Areica degli Elementi di Involucro (Piano Primo)

Come già evidenziato, per ogni elemento la capacità termica interna areica risulta superiore nella struttura massiva rispetto alla struttura leggera, questo significa che a parità di ricambi d'aria (quindi per $H_{ve,adj}$ costante) la costante di tempo associata alla struttura massiva sarà sicuramente superiore rispetto alla costante di tempo associata alla struttura leggera (si ricordi che poiché le trasmittanze termiche degli elementi massivi e leggeri sono circa uguali tra loro anche $H_{tr,adj}$ sarà costante).

Come è possibile notare dalla tabella 64 le caratteristiche degli elementi del piano terra coincidono sia nel caso studio 2 che nel caso studio 3, questo si verifica poiché la differenza tra le due tipologie di edificio è data solo dall'isolamento del solaio di sottotetto. Ciò comporterà che le costanti di tempo associate al piano terra del caso studio 2 e del caso studio 3 coincideranno tra loro e quindi si otterranno gli stessi risultati riguardo la variazione dei parametri. Analizzando la tabella relativa al piano primo si nota come l'unica struttura a variare sia il solaio di sottotetto, per questo l'analisi 2 consisterà in un confronto tra la zona termica del primo piano tra il caso studio 2 e il caso studio 3, così da approfondire anche i risultati, inerenti al primo piano, che si otterranno dall'analisi che si sta per intraprendere.

5.1.1.1.1 Caso Studio 2: Solaio di Sottotetto Isolato con Copertura non Isolata

Case Study 2			
Tipe of Structure	Time Constant [h]	$H_{tr,adj}$ [W/K]	$H_{ve,adj}$ [W/K]
[-]	[h]	[W/K]	[W/K]
Ground Floor			
Massive Structure n=0,50	69.84	46.06	15.90
Massive Structure n=0,10	87.88	46.06	3.18
Lightweight Structure n=0,50	56.90	46.40	15.90
Lightweight Structure n=0,10	71.49	46.40	3.18
First Floor			
Massive Structure n=0,50	76.27	43.74	15.73
Massive Structure n=0,10	90.70	43.74	3.15
Lightweight Structure n=0,50	46.66	43.98	15.73
Lightweight Structure n=0,10	55.54	43.98	3.15

Tabella 66: Costante di Tempo e Coefficienti di Scambio Termico per Trasmissione e Ventilazione al Variare della Tipologia di Struttura e dei Ricambi di Aria (Caso Studio 2)

Per ogni zona termica sono state realizzate due tipologie di grafici: nel primo sono riportate le costanti di tempo della struttura massiva e leggera al variare di n, mentre nel secondo caso sono riportate le costanti di tempo al variare della tipologia di struttura, mantenendo fisso n. Questi grafici permetteranno di studiare separatamente l'incidenza della variazione di n dall'incidenza della variazione della tipologia di struttura sulla costante di tempo, in modo tale da stabilire quale variazione tra le due pesi maggiormente sul suo valore.

- Piano Terra

Analizzando il grafico 92 (analisi della costante di tempo in funzione della variazione di n) è possibile notare che sia nel caso di struttura massiva che nel caso di struttura leggera la variazione di n dal valore di 0,50 al valore di 0,10 comporta un aumento della costante di tempo. Come già evidenziato una diminuzione del valore di n comporta una diminuzione del coefficiente di scambio termico per la ventilazione, che nell'equazione della costante di tempo si trova al denominatore. La riduzione del coefficiente $H_{ve,adj}$, a parità di capacità termica interna C_m e di coefficiente di scambio termico per trasmissione $H_{tr,adj}$ (perché si sta mantenendo fissa la tipologia di struttura), comporta un aumento della costante di tempo, che in questo caso è di circa il 26%.

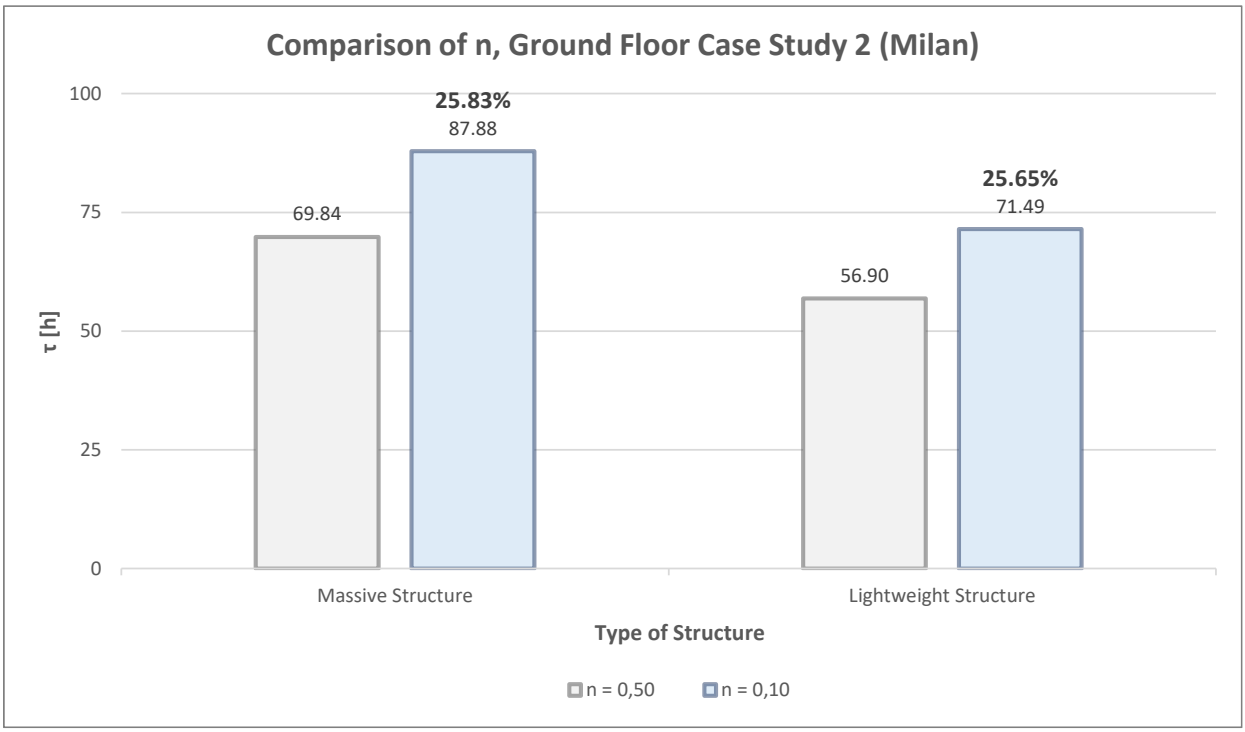

Grafico 92: Valore della Costante di Tempo al Variare di n [1/h] (Caso Studio 2, Piano Terra)

Analizzando il grafico 93 (analisi della costante di tempo in funzione della tipologia di struttura) si nota come sia nel caso di n pari a 0,50 sia nel caso di n pari a 0,10 la struttura massiva risulti avere una costante di tempo maggiore rispetto alla struttura leggera. In questo caso sarà il valore della capacità termica interna C_m a variare, mantenendo costanti i coefficienti di scambio termico per trasmissione e ventilazione (le trasmittanze termiche delle strutture leggere sono molto simili a quelle delle strutture massive, mentre n è stato fissato in modo tale che l'unico valore a variare sia proprio C_m). In questo caso la variazione da struttura leggera a massiva comporta un aumento della costante di tempo di circa il 23%.

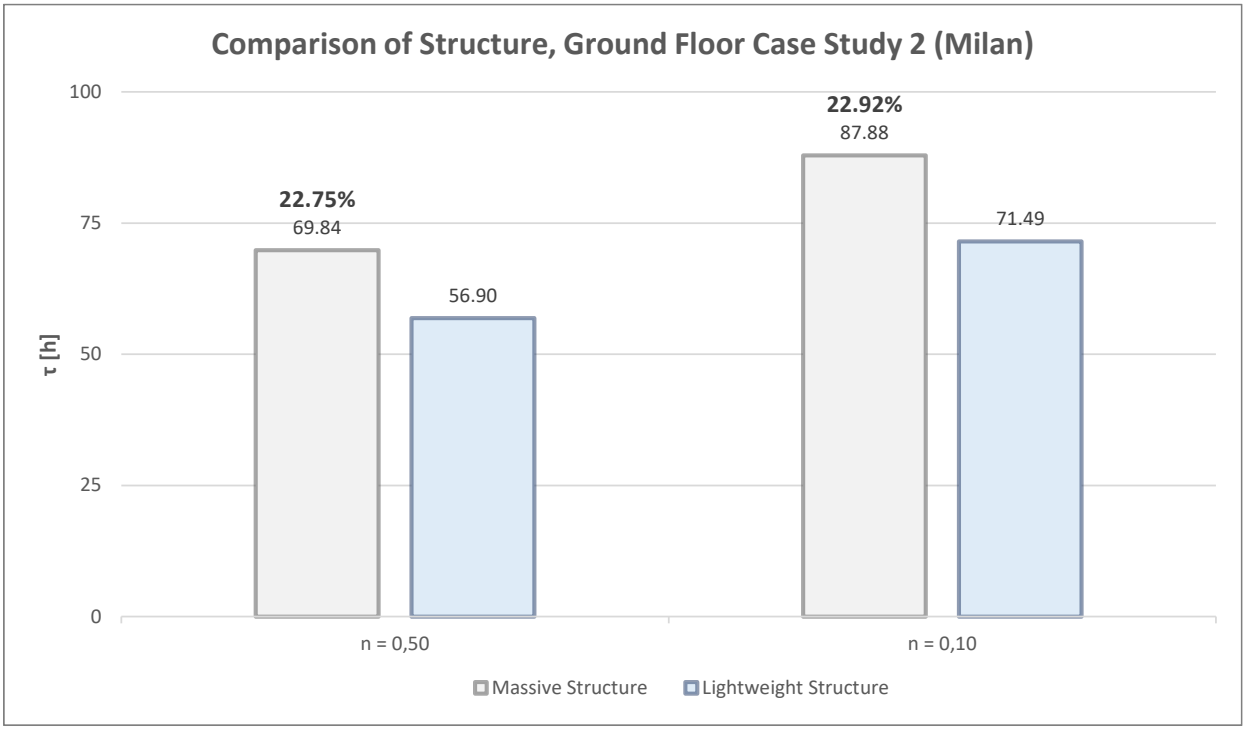

Grafico 93: Valore della Costante di Tempo al Variare della Tipologia di Struttura (Caso Studio 2, Piano Terra)

Confrontando i due grafici la variazione percentuale maggiore della costante di tempo è attribuibile alla variazione di n, quindi nel calcolo della costante di tempo associata al piano terra del caso studio 2 avrà un maggior peso la variazione di n rispetto alla variazione della tipologia di struttura.

- Piano Primo

Il comportamento della variazione della costante di tempo segue lo stesso andamento già evidenziato per il piano terra, ovvero al diminuire di n la costante di tempo aumenta, come aumenta passando dalla struttura leggera a quella massiva. L'unica differenza rispetto alla zona termica precedente sono le percentuali di incremento della costante di tempo, in questo caso si nota come pesi in modo nettamente superiore il passaggio dalla struttura leggera alla struttura massiva (a parità di n) rispetto alla variazione di n (a parità di tipologia di struttura). Osservando la tabella 64 è possibile individuare la motivazione di tale risultato. Al piano primo è presente il solaio di sottotetto che risulta avere una notevole differenza di capacità termica interna areica tra la struttura massiva e quella leggera, mentre al piano terra è presente il solaio contro-terra che si mantiene fisso per entrambe le tipologie di struttura. Questo porta ad avere, per il primo piano, un incremento di capacità termica interna C_m tra struttura leggera e struttura massiva molto superiore rispetto all'incremento di capacità termica interna che si ha nel piano terra. Ciò significa che aumentando di molto la capacità termica interna C_m la riduzione del coefficiente di scambio termico per ventilazione $H_{ve,adj}$ comincerà a pesare meno, ed è proprio ciò che si verifica in questo caso. Quindi nel calcolo della costante di tempo associata al piano primo del caso studio 2 avrà un maggior peso la variazione di struttura piuttosto che la variazione di n.

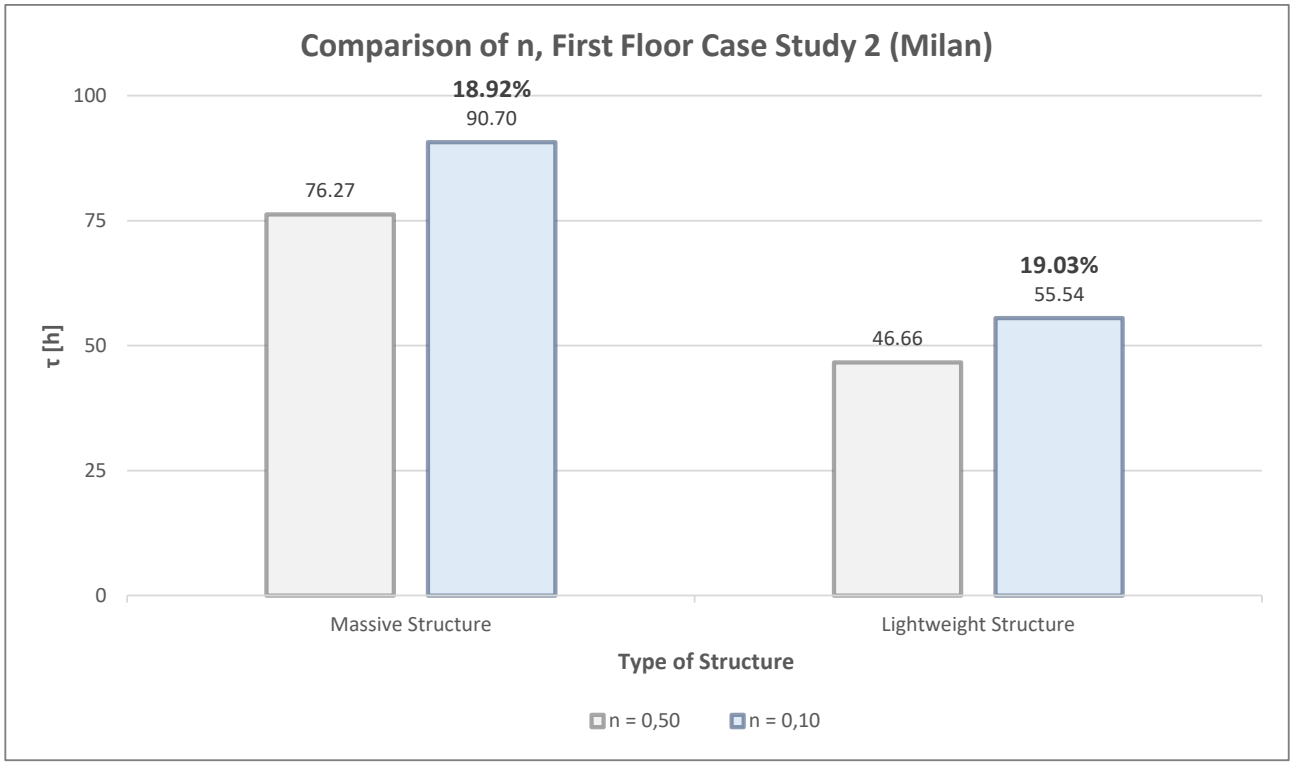

Grafico 94: Valore della Costante di Tempo al Variare di n [1/h] (Caso Studio 2, Piano Primo)

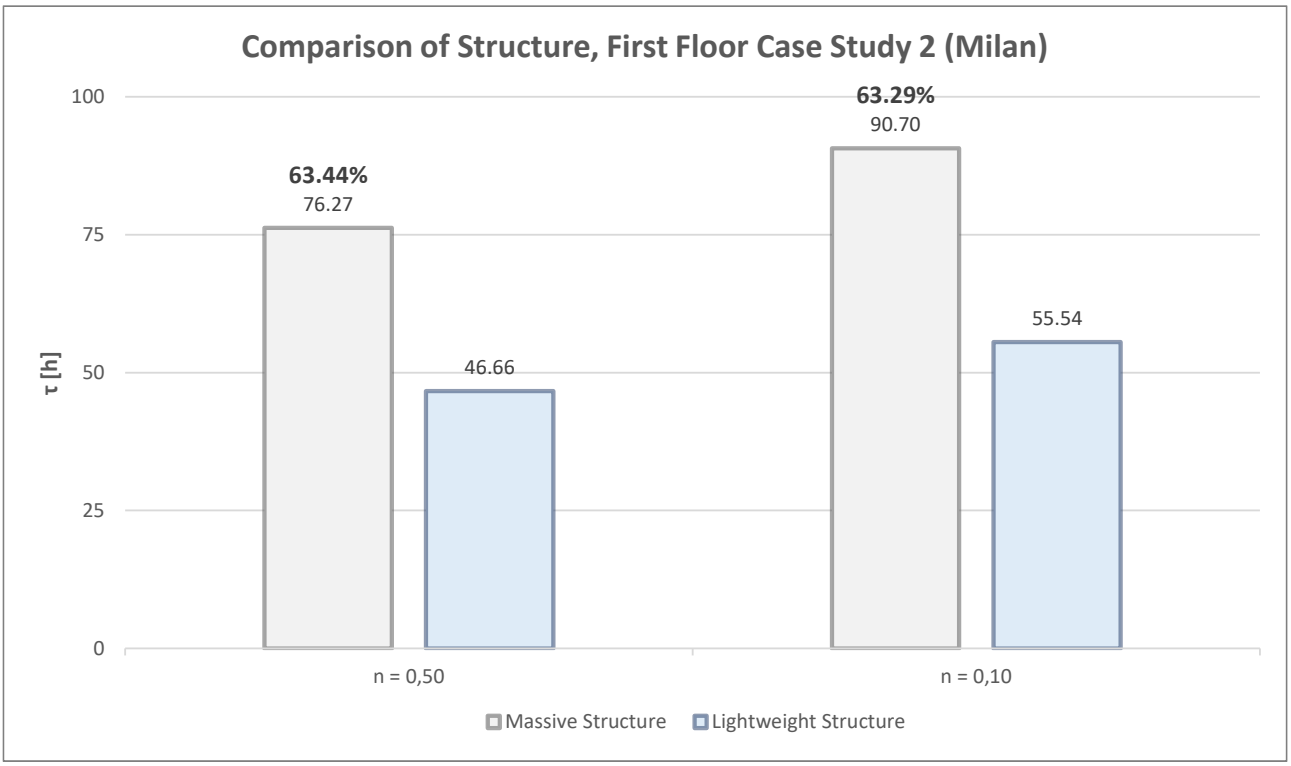

Grafico 95: Valore della Costante di Tempo al Variare della Tipologia di Struttura (Caso Studio 2, Piano Primo)

5.1.1.1.2 Caso Studio 3 Solaio di Sottotetto non Isolato con Copertura Isolata

Case Study 3			
Tipe of Structure	Time Constant [h]	$H_{tr,adj}$ [W/K]	$H_{ve,adj}$ [W/K]
[-]	[h]	[W/K]	[W/K]
Ground Floor			
Massive Structure n=0,50	69.84	46.06	15.90
Massive Structure n=0,10	87.88	46.06	3.18
Lightweight Structure n=0,50	56.90	46.40	15.90
Lightweight Structure n=0,10	71.49	46.40	3.18
First Floor			
Massive Structure n=0,50	60.63	52.26	15.73
Massive Structure n=0,10	74.40	52.26	3.15
Lightweight Structure n=0,50	41.53	51.97	15.73
Lightweight Structure n=0,10	51.02	51.97	3.15

Tabella 67: Costante di Tempo e Coefficienti di Scambio Termico per Trasmissione e Ventilazione al Variare della Tipologia di Struttura e dei Ricambi di Aria (Caso Studio 3)

- Piano Terra

Come anticipato in precedenza, i risultati associati al piano terra del caso studio 3 coincidono esattamente con i risultati studiati per il piano terra del caso studio 2. Questo si verifica poiché le tipologie di edificio identificate dai due casi studio non differiscono in nessun elemento nel piano terra, a differenza del piano primo dove è presente un solaio di sottotetto che nel caso studio 2 risulta essere isolato mentre nel caso studio 3 risulta essere non isolato.

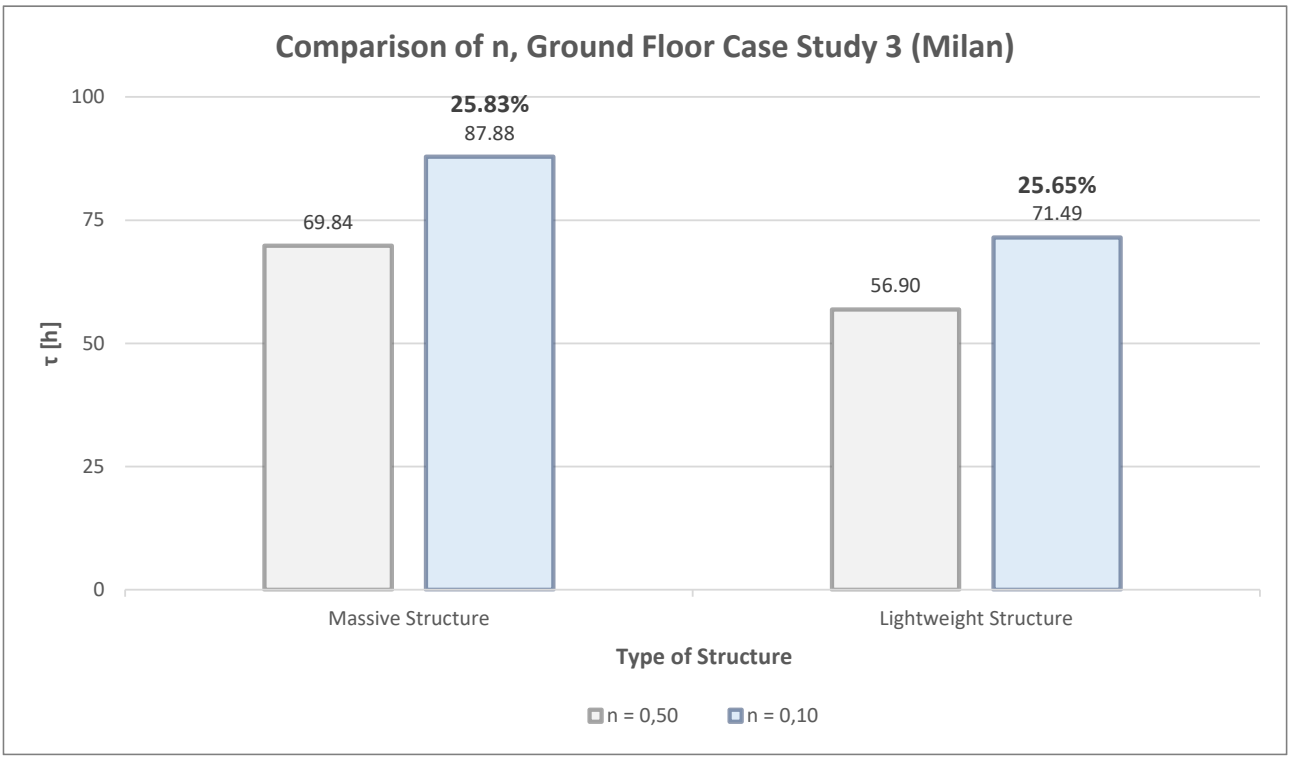

Grafico 96: Valore della Costante di Tempo al Variare di n [1/h] (Caso Studio 3, Piano Terra)

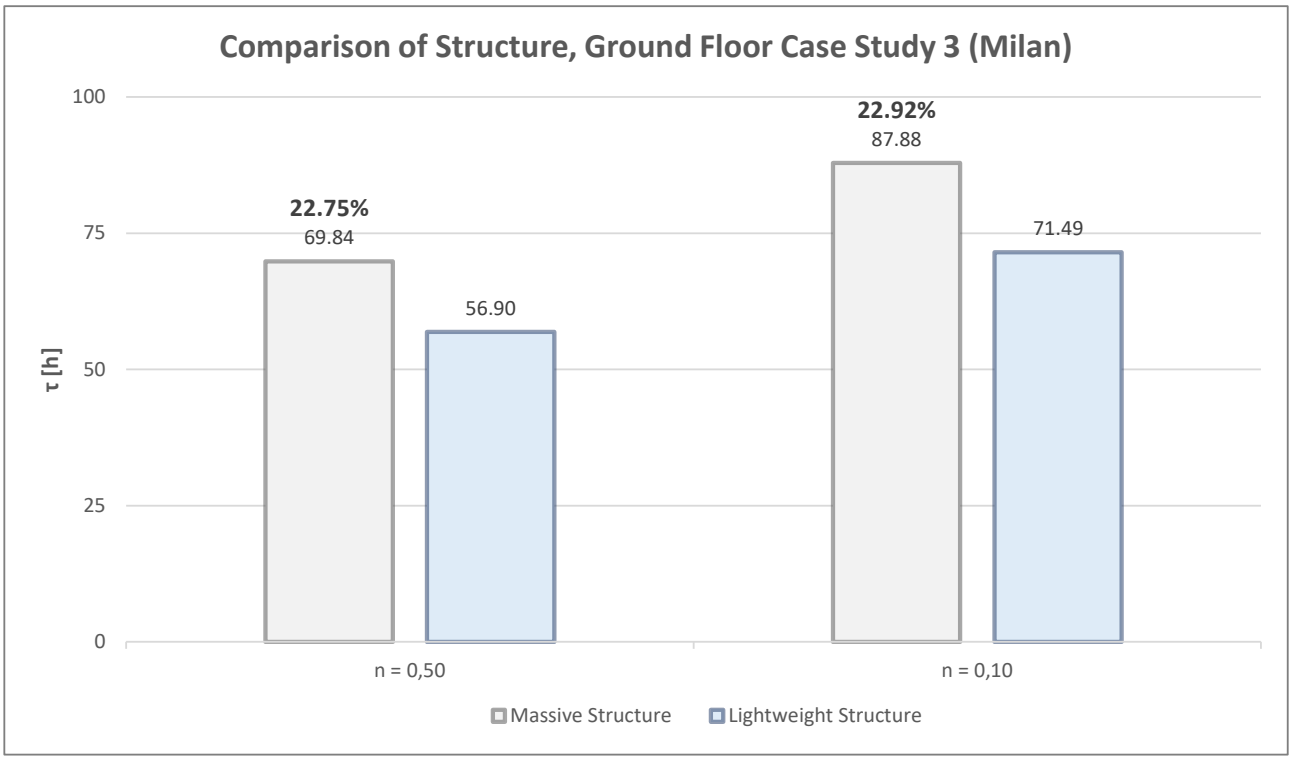

Grafico 97: Valore della Costante di Tempo al Variare della Tipologia di Struttura (Caso Studio 3, Piano Terra)

- Piano Primo

Il comportamento della variazione della costante di tempo segue lo stesso andamento già evidenziato per il piano primo riferito al caso studio 2, ovvero al diminuire di n la costante di tempo aumenta, come aumenta passando dalla struttura leggera a quella massiva, inoltre nel calcolo della costante di tempo avrà un maggior peso la variazione di struttura piuttosto che la variazione di n. L'unica differenza rispetto al piano primo del

caso studio 2 è riscontrabile nell'incremento percentuale della costante di tempo nel passaggio dalla struttura leggera alla struttura massiva. In questo caso la percentuale è molto ridotta rispetto a quella che si ha nel piano primo del caso studio precedente, questo è dovuto al fatto che la struttura massiva del solaio di sottotetto non isolato ha una capacità termica interna areica minore rispetto alla struttura massiva del solaio di sottotetto isolato (tabella 65), inoltre il solaio non isolato avrà una trasmittanza termica maggiore rispetto al solaio isolato, questo comporta un aumento del coefficiente di scambio termico per trasmissione $H_{tr,adj}$. Il confronto del piano primo tra i due casi studio verrà approfondito nell'analisi 2, queste osservazioni hanno lo scopo di motivare i diversi incrementi percentuali.

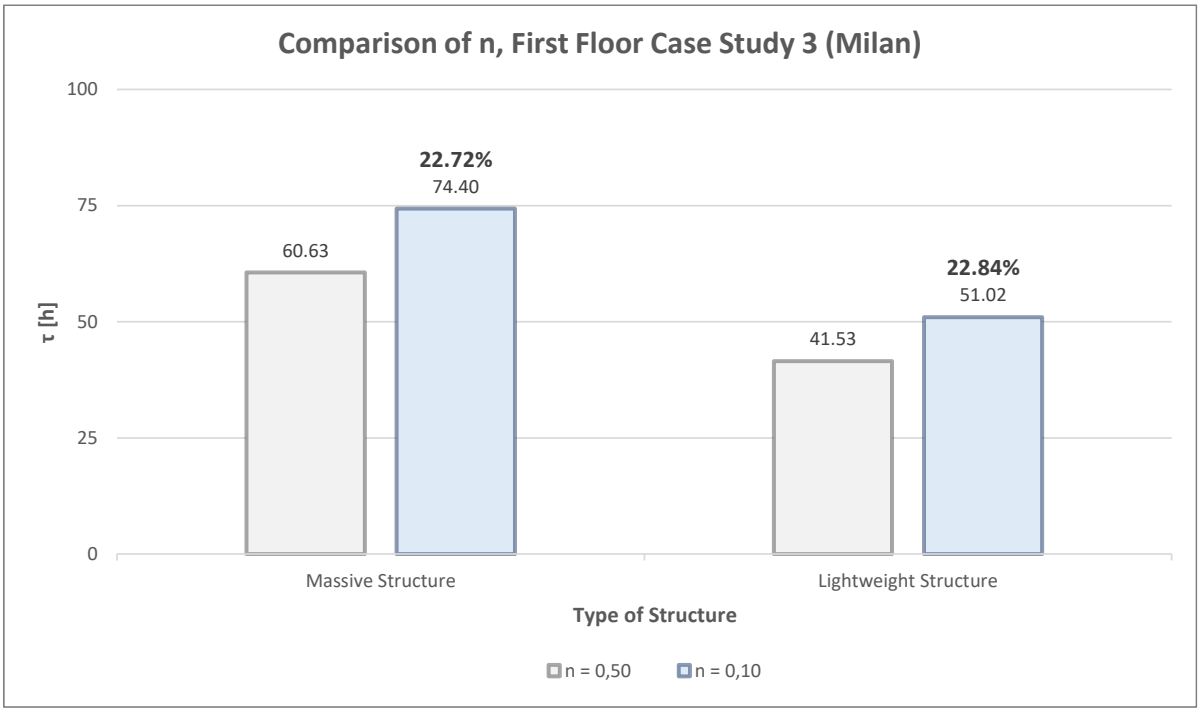

Grafico 98: Valore della Costante di Tempo al Variare di n [1/h] (Caso Studio 3, Piano Primo)

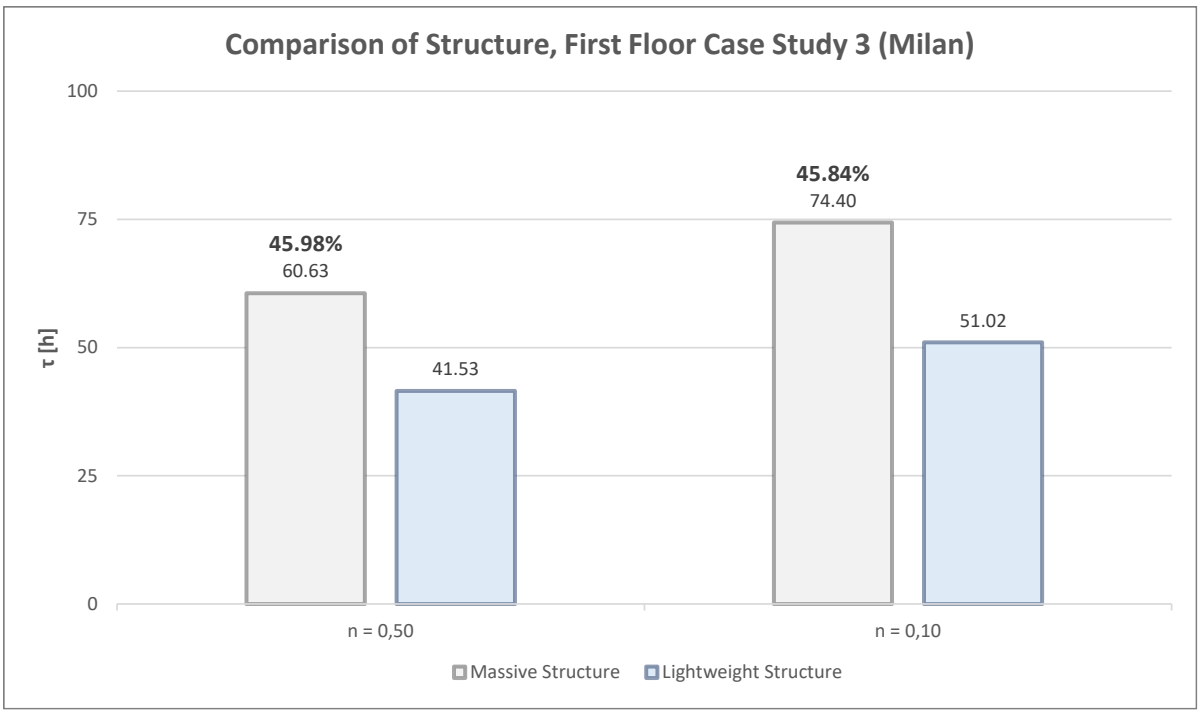

Grafico 99: Valore della Costante di Tempo al Variare della Tipologia di Struttura (Caso Studio 3, Piano Primo)

5.1.1.2 Roma

Areal Internal Heat Capacity k_J [kJ/m^{2}K] (Ground Floor)			
Case Study 2 / Case Study 3			
	Massive Structure	Lightweight Structure	Percentage Increase %
External Wall	35.76	22.11	61.74%
Internal Wall	50.99	30.50	67.18%
Internal Floor	77.37	78.48	-1.42%
Ground Floor	62.56	62.56	0.00%
Consequence	> $C_{m,M}$	< $C_{m,L}$	**$C_{m,M}$ > $C_{m,L}$**

Tabella 68: Roma, Capacità Termica Interna Areica degli Elementi di Involucro (Piano Terra)

Areal Internal Heat Capacity k_J [kJ/m^{2}K] (First Floor)			
Case Study 2			
	Massive Structure	Lightweight Structure	Percentage Increase %
External Wall	35.76	22.11	61.74%
Internal Wall	50.99	30.50	67.18%
Internal Floor	77.37	78.48	-1.42%
Sub-Roofing Floor (Isolated)	34.40	5.24	556.51%
Consequence	>>> $C_{m,M}$	<<< $C_{m,L}$	**$C_{m,M}$ >>> $C_{m,L}$**
Case Study 3			
	Massive Structure	Lightweight Structure	Percentage Increase %
External Wall	35.76	22.11	61.74%
Internal Wall	50.99	30.50	67.18%
Internal Floor	77.37	78.48	-1.42%
Sub-Roofing Floor (Not Isolated)	32.52	7.54	331.41%
Consequence	>> $C_{m,M}$	<< $C_{m,L}$	**$C_{m,M}$ >> $C_{m,L}$**

Tabella 69: Roma, Capacità Termica Interna Areica degli Elementi di Involucro (Piano Primo)

Per ogni elemento la capacità termica interna areica risulta superiore nella struttura massiva rispetto alla struttura leggera, questo significa che a parità di ricambi d'aria (quindi per $H_{ve,adj}$ costante) la costante di tempo associata alla struttura massiva sarà sicuramente superiore rispetto alla costante di tempo associata alla struttura leggera (si ricordi che poiché le trasmittanze termiche degli elementi massivi e leggeri sono circa uguali tra loro anche $H_{tr,adj}$ sarà costante). Le caratteristiche degli elementi del piano terra coincidono sia nel caso studio 2 che nel caso studio 3, questo si verifica poiché la differenza tra le due tipologie di edificio è data solo dall'isolamento del solaio di sottotetto. Ciò comporterà che le costanti di tempo associate al piano terra del caso studio 2 e del caso studio 3 coincideranno tra loro e quindi si otterranno gli stessi risultati riguardo la variazione dei parametri. Come per Milano, l'unica struttura del piano primo a variare è il solaio di sottotetto.

5.1.1.2.1 Caso Studio 2: Solaio di Sottotetto Isolato con Copertura non Isolata

Case Study 2			
Tipe of Structure	Time Constant [h]	$H_{tr,adj}$ [W/K]	$H_{ve,adj}$ [W/K]
[-]	[h]	[W/K]	[W/K]
Ground Floor			
Massive Structure n=0,50	58.17	58.88	15.90
Massive Structure n=0,10	70.09	58.88	3.18
Lightweight Structure n=0,50	49.50	55.89	15.90
Lightweight Structure n=0,10	60.16	55.89	3.18
First Floor			
Massive Structure n=0,50	55.24	59.87	15.73
Massive Structure n=0,10	61.72	59.87	3.15
Lightweight Structure n=0,50	38.67	56.31	15.73
Lightweight Structure n=0,10	44.01	56.31	3.15

Tabella 70: Costante di Tempo e Coefficienti di Scambio Termico per Trasmissione e Ventilazione al Variare della Tipologia di Struttura e dei Ricambi di Aria (Caso Studio 2)

Una differenza che si può notare rispetto al caso di Milano è l'aumento dei coefficienti di scambio termico per trasmissione $H_{tr,adj}$. Questo, oltre al cambiamento di località climatica, è dovuto al fatto che gli elementi dell'involucro hanno trasmittanze termiche superiori rispetto agli elementi dell'involucro riferiti alla località di Milano. Nuovamente, per ogni zona termica sono state realizzate due tipologie di grafici: nel primo sono riportate le costanti di tempo della struttura massiva e leggera al variare di n, mentre nel secondo sono riportate le costanti di tempo al variare della tipologia di struttura, mantenendo fisso n.

- Piano Terra

Analizzando il grafico 100 (analisi della costante di tempo in funzione della variazione di n) è possibile notare che sia nel caso di struttura massiva che nel caso di struttura leggera la variazione di n dal valore di 0,50 al valore di 0,10 comporta un aumento della costante di tempo. Come già evidenziato una diminuzione del valore di n comporta una diminuzione del coefficiente di scambio termico per la ventilazione, che nell'equazione della costante di tempo si trova al denominatore. La riduzione del coefficiente $H_{ve,adj}$, a parità di capacità termica interna C_m e di coefficiente di scambio termico per trasmissione $H_{tr,adj}$ (perché si sta mantenendo fissa la tipologia di struttura), comporta un aumento della costante di tempo, che in questo caso è di circa il 20%.

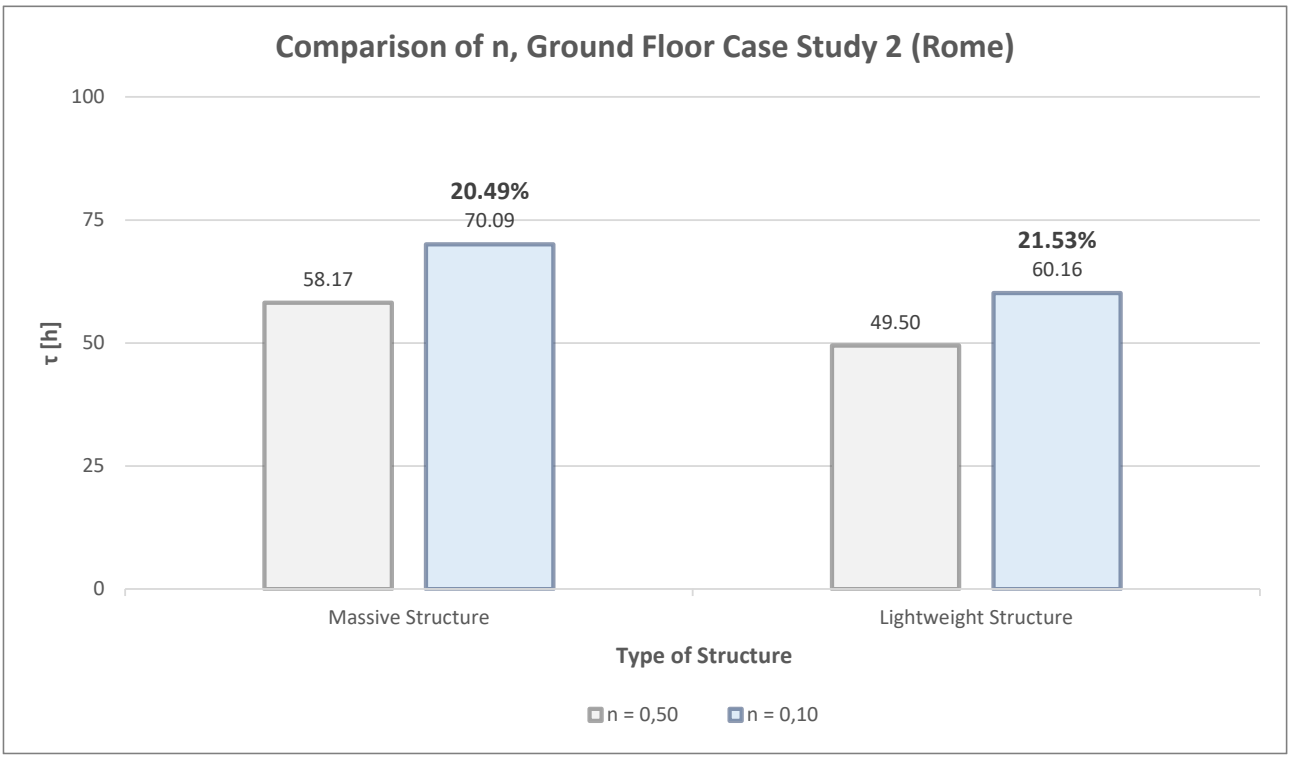

Grafico 100: Valore della Costante di Tempo al Variare di n [1/h] (Caso Studio 2, Piano Terra)

Analizzando il grafico 101 (analisi della costante di tempo in funzione della tipologia di struttura) si nota come sia nel caso di n pari a 0,50 sia nel caso di n pari a 0,10 la struttura massiva risulti avere una costante di tempo maggiore rispetto alla struttura leggera. In questo caso sarà il valore della capacità termica interna C_m a variare, mantenendo costanti i coefficienti di scambio termico per trasmissione e ventilazione (le trasmittanze termiche delle strutture leggere sono molto simili a quelle delle strutture massive, mentre n è stato fissato in modo tale che l'unico valore a variare sarà proprio C_m). In questo caso la variazione da struttura leggera a massiva comporta un aumento della costante di tempo di circa il 17%.

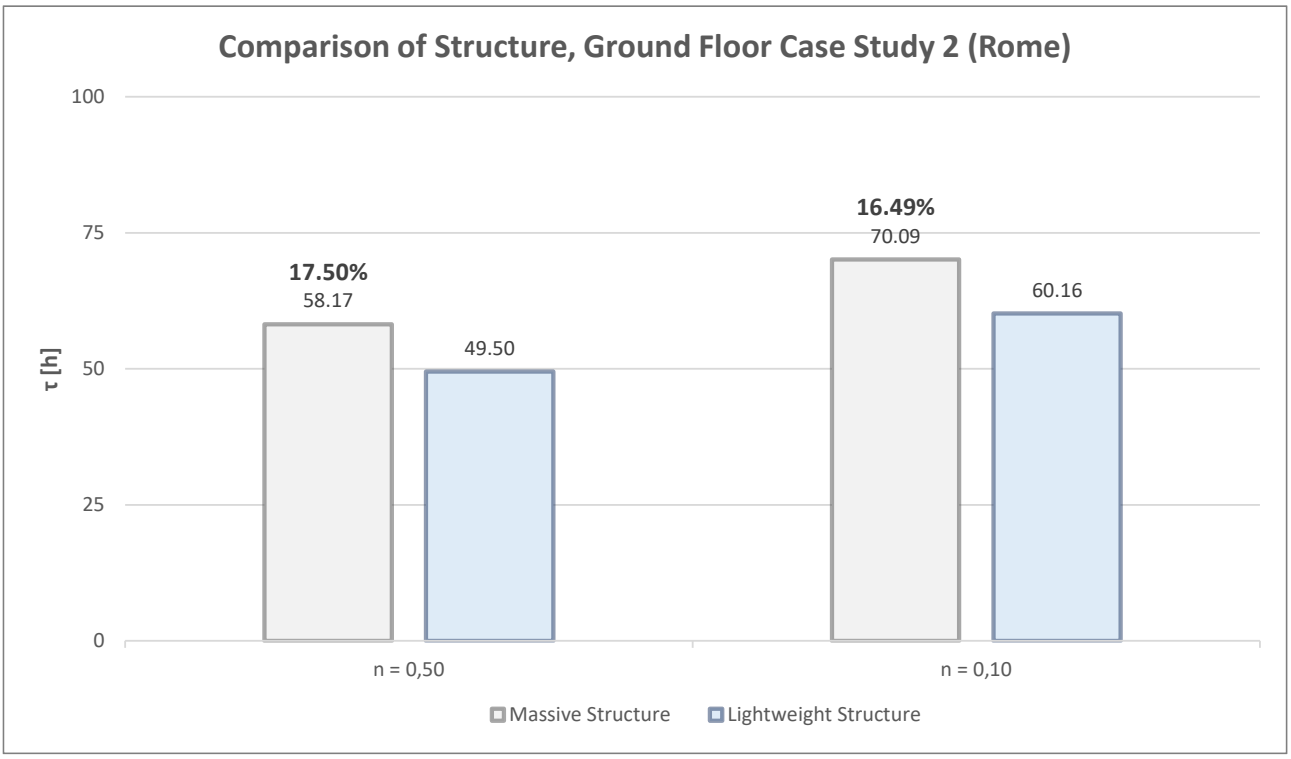

Grafico 101: Valore della Costante di Tempo al Variare della Tipologia di Struttura (Caso Studio 2, Piano Terra)

Confrontando i due grafici la variazione percentuale maggiore della costante di tempo è attribuibile alla variazione di n, quindi nel calcolo della costante di tempo associata al piano terra del caso studio 2 avrà un maggior peso la variazione di n rispetto alla variazione della tipologia di struttura.

- Piano Primo

Il comportamento della variazione della costante di tempo segue lo stesso andamento già evidenziato per il piano terra, ovvero al diminuire di n la costante di tempo aumenta, come aumenta passando dalla struttura leggera a quella massiva. L'unica differenza rispetto alla zona termica precedente sono le percentuali di incremento della costante di tempo, in questo caso si nota come pesi in modo nettamente superiore il passaggio dalla struttura leggera alla struttura massiva (a parità di n) rispetto alla variazione di n (a parità di tipologia di struttura). Osservando la tabella 68 è possibile individuare la motivazione di tale risultato. Al piano primo è presente il solaio di sottotetto che risulta avere una notevole differenza di capacità termica interna areica tra la struttura massiva e quella leggera, mentre al piano terra è presente il solaio contro-terra che si mantiene fisso per entrambe le tipologie di struttura. Questo porta ad avere, per il primo piano, un incremento di capacità termica interna C_m tra struttura leggera e struttura massiva molto superiore rispetto all'incremento di capacità termica interna che si ha nel piano terra. Ciò significa che aumentando di molto la capacità termica interna C_m la riduzione del coefficiente di scambio termico per ventilazione $H_{ve,adj}$ comincerà a pesare meno, ed è proprio ciò che si verifica in questo caso. Quindi nel calcolo della costante di tempo associata al piano primo del caso studio 2 avrà un maggior peso la variazione di struttura piuttosto che la variazione di n.

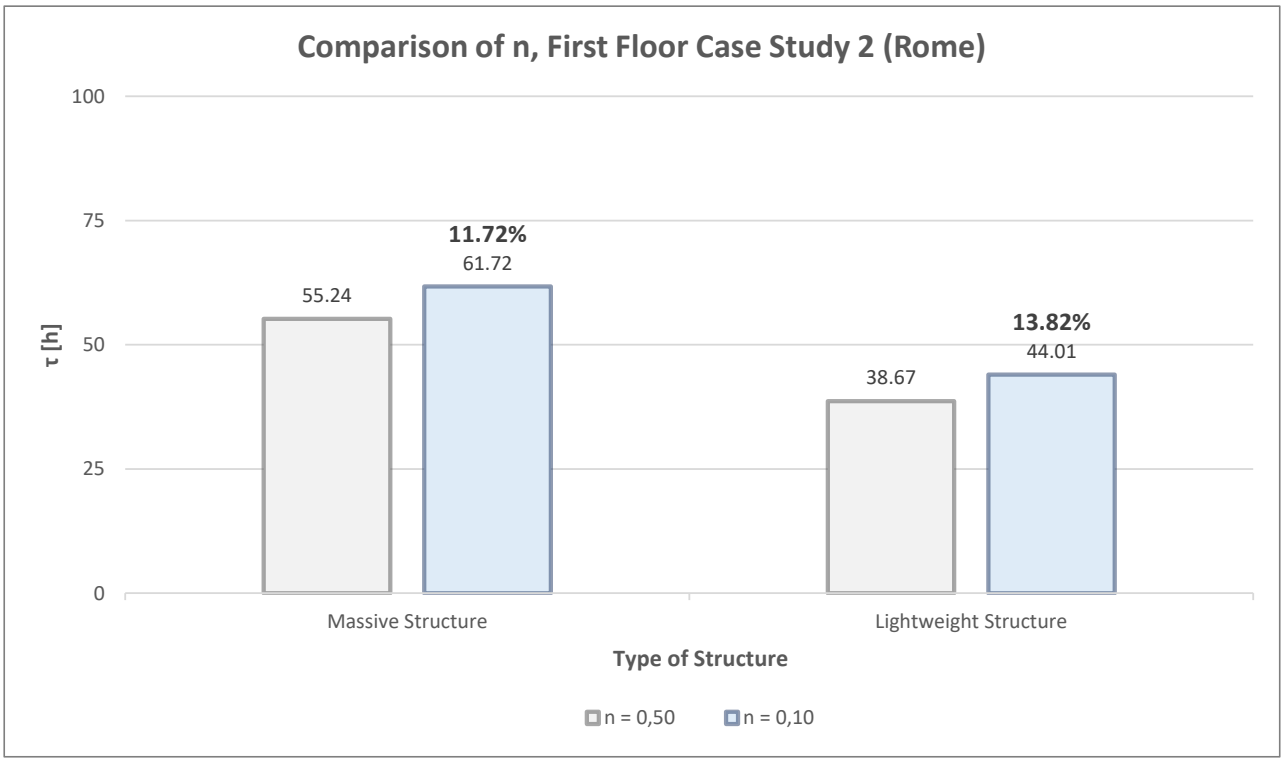

Grafico 102: Valore della Costante di Tempo al Variare di n [1/h] (Caso Studio 2, Piano Primo)

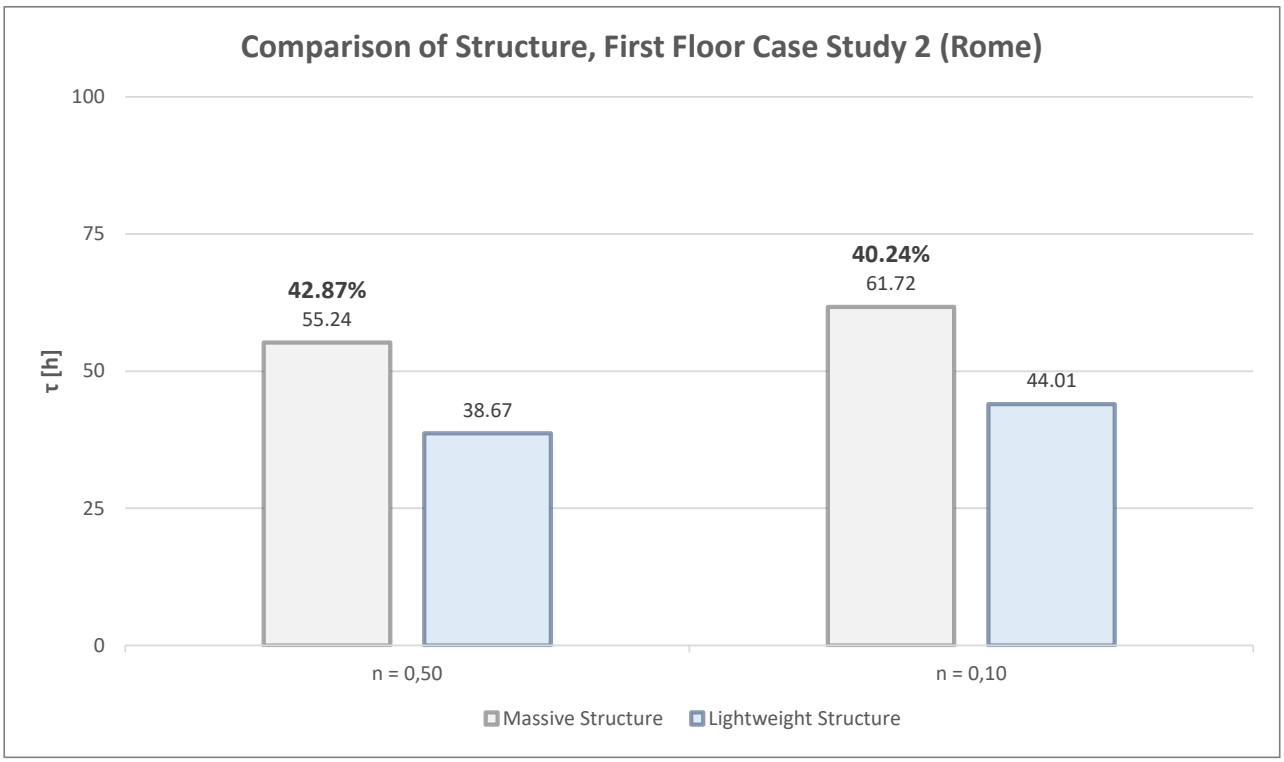

Grafico 103: Valore della Costante di Tempo al Variare della Tipologia di Struttura (Caso Studio 2, Piano Primo)

Rispetto a Milano l'incremento percentuale che si ottiene passando da una struttura leggera ad una struttura massiva è minore. La percentuale risulta comunque rilevante, ma non come nel caso di Milano, questo è dovuto al fatto che la capacità termica interna areica del solaio di sottotetto del caso studio 2 a Milano, pari a 58,05 kJ/m^{2}K, è superiore rispetto a quella del solaio di sottotetto del caso studio 2 a Roma, pari a 34,40

kJ/m^{2}K. Ciò significa che l'aumento di capacità termica interna C_m passando da una struttura leggera ad una massiva è superiore a Milano rispetto che a Roma.

5.1.1.2.2 Caso Studio 3: Solaio di Sottotetto non Isolato con Copertura Isolata

Case Study 3			
Tipe of Structure	Time Constant [h]	$H_{tr,adj}$ [W/K]	$H_{ve,adj}$ [W/K]
[-]	[h]	[W/K]	[W/K]
Ground Floor			
Massive Structure n=0,50	58.17	58.88	15.90
Massive Structure n=0,10	70.09	58.88	3.18
Lightweight Structure n=0,50	49.50	55.89	15.90
Lightweight Structure n=0,10	60.16	55.89	3.18
First Floor			
Massive Structure n=0,50	49.91	67.35	15.73
Massive Structure n=0,10	58.82	67.35	3.15
Lightweight Structure n=0,50	34.99	64.93	15.73
Lightweight Structure n=0,10	41.46	64.93	3.15

Tabella 71: Costante di Tempo e Coefficienti di Scambio Termico per Trasmissione e Ventilazione al Variare della Tipologia di Struttura e dei Ricambi di Aria (Caso Studio 3)

- Piano Terra

Come anticipato in precedenza, i risultati associati al piano terra del caso studio 3 coincidono esattamente con i risultati studiati per il piano terra del caso studio 2. Questo si verifica poiché le tipologie di edificio identificate dai due casi studio non differiscono in nessun elemento nel piano terra, a differenza del piano primo dove è presente un solaio di sottotetto che nel caso studio 2 risulta essere isolato mentre nel caso studio 3 risulta essere non isolato.

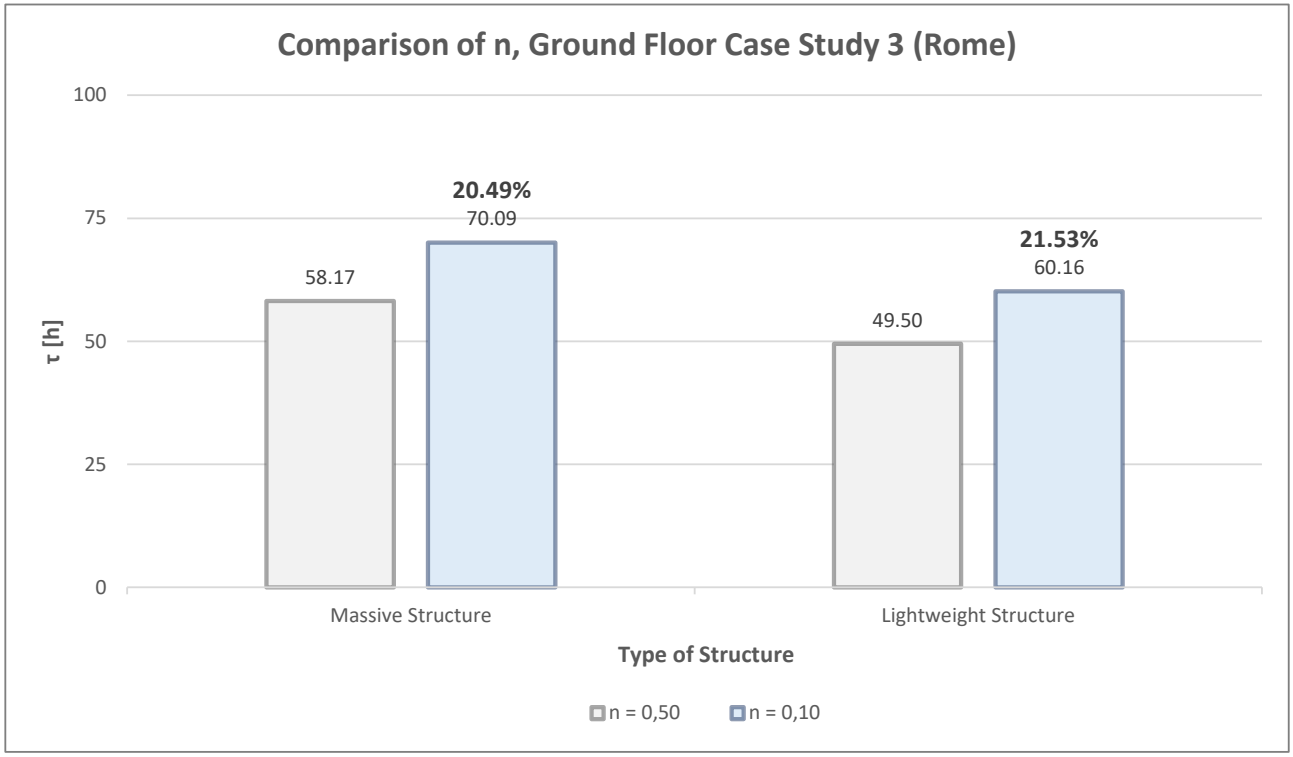

Grafico 104: Valore della Costante di Tempo al Variare di n [1/h] (Caso Studio 3, Piano Terra)

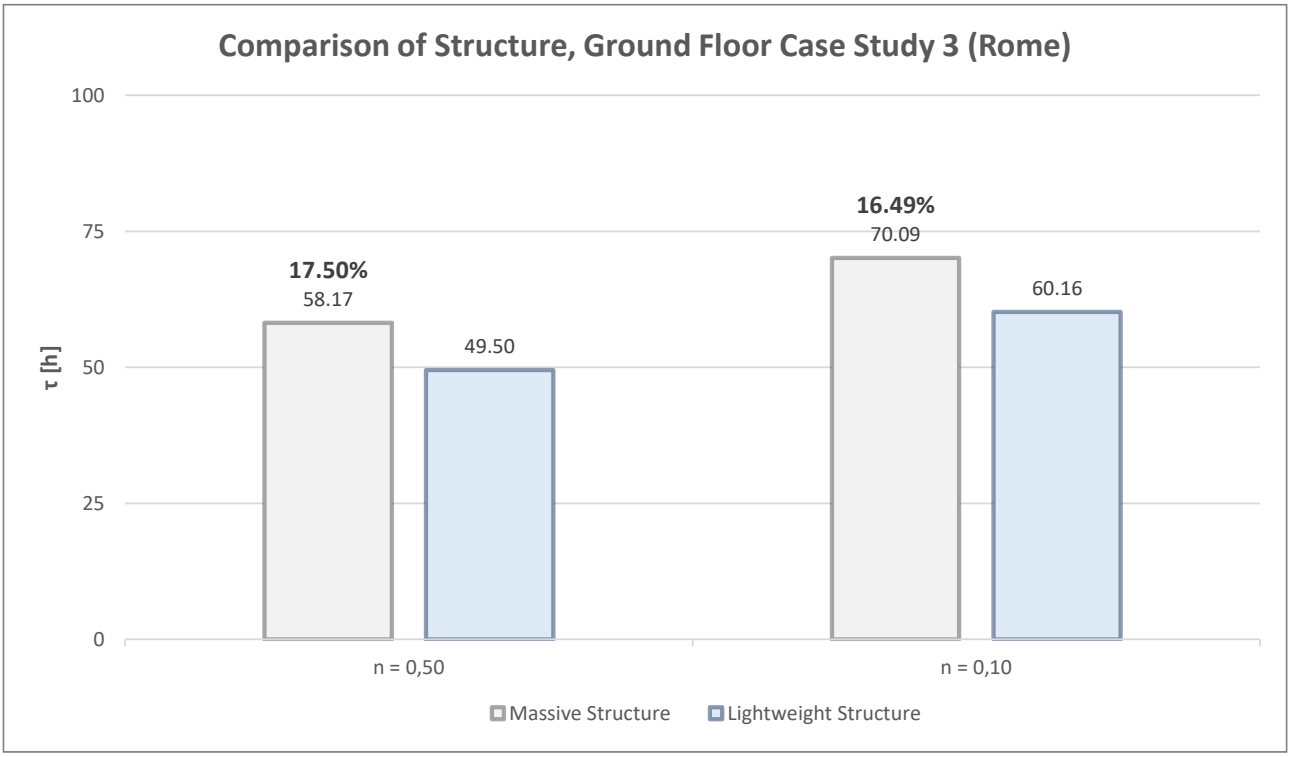

Grafico 105: Valore della Costante di Tempo al Variare della Tipologia di Struttura (Caso Studio 3, Piano Terra)

- Piano Primo

Il comportamento della variazione della costante di tempo segue lo stesso andamento già evidenziato per il piano primo riferito al caso studio 2, ovvero al diminuire di n la costante di tempo aumenta, come aumenta passando dalla struttura leggera a quella massiva, inoltre nel calcolo della costante di tempo avrà un maggior peso la variazione di struttura piuttosto che la variazione di n. Rispetto al caso di Milano è possibile notare come le percentuali di incremento, riferite al passaggio dalla struttura leggera alla struttura massiva, non siano molto diverse rispetto a quelle del piano primo riferito al caso studio 2. Ciò accade perché nel caso della struttura massiva la differenza di capacità termica interna areica tra le due tipologie di solaio (quindi tra il caso studio 2 e il caso studio 3) non è elevata come accade a Milano, inoltre l'aumento del coefficiente di scambio termico per trasmissione $H_{tr,adj}$ dal caso studio 2 al caso studio 3 sarà minore rispetto all'aumento riscontrato a Milano. Questo si verifica poiché la trasmittanza termica del solaio isolato a Roma è maggiore della trasmittanza termica del solaio isolato a Milano, ciò comporta una minore differenza con la trasmittanza termica del solaio non isolato e quindi un minor aumento del coefficiente di scambio termico per trasmissione. L'incidenza di questi aspetti sul valore della costante di tempo riguardante il piano primo sarà affrontata nell'analisi 2, queste osservazioni hanno lo scopo di motivare i diversi incrementi percentuali riscontrati tra le due località.

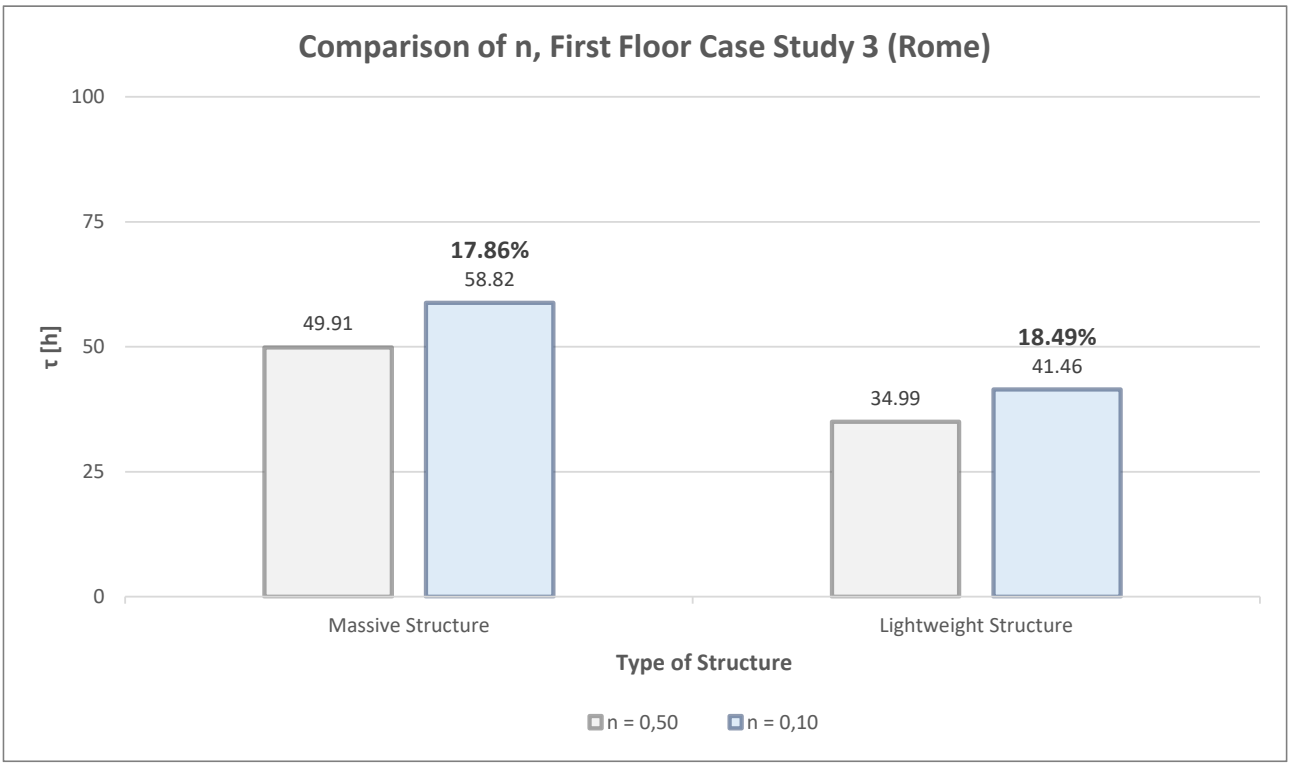

Grafico 106: Valore della Costante di Tempo al Variare di n [1/h] (Caso Studio 3, Piano Primo)

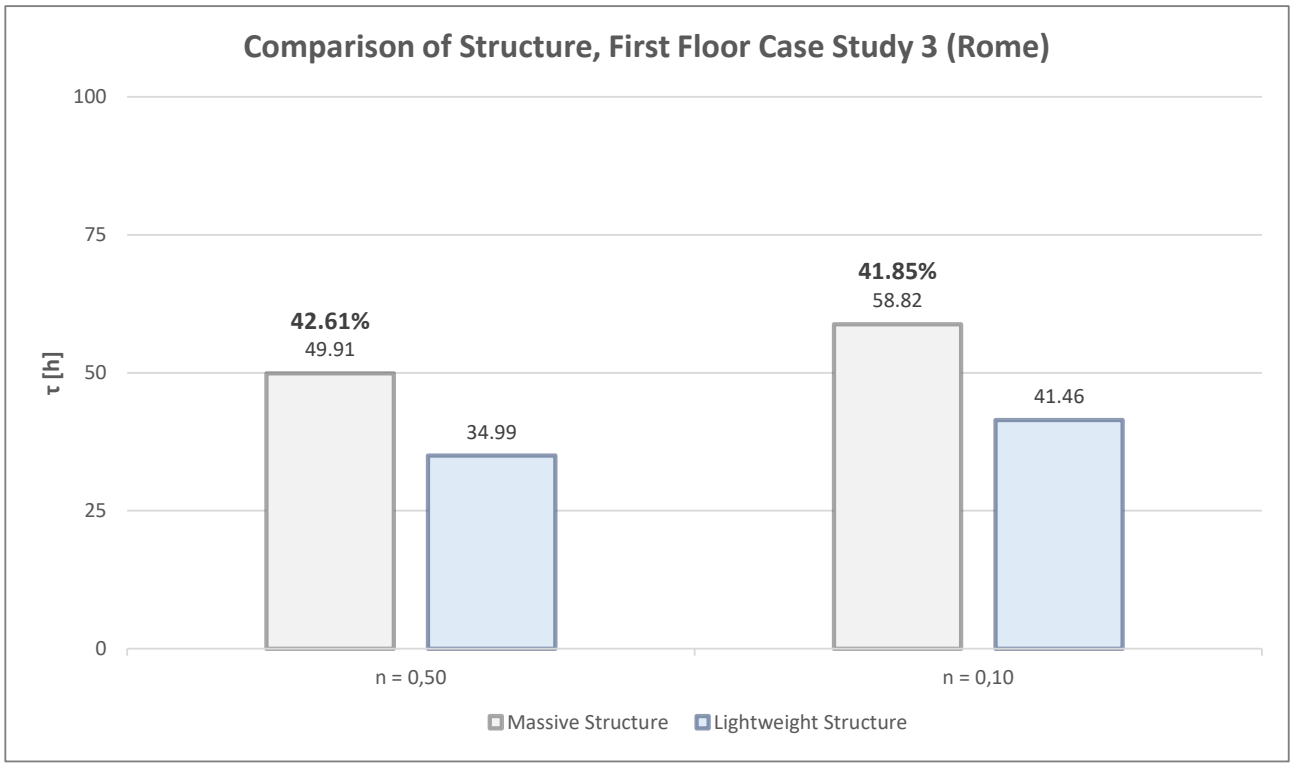

Grafico 107: Valore della Costante di Tempo al Variare della Tipologia di Struttura (Caso Studio 3, Piano Primo)

5.1.1.3 Palermo

Areal Internal Heat Capacity k_J [kJ/m^{2}K] (Ground Floor)			
Case Study 2 / Case Study 3			
	Massive Structure	Lightweight Structure	Percentage Increase %
External Wall	40.55	22.79	77.92%
Internal Wall	50.99	30.50	67.18%
Internal Floor	77.37	78.48	-1.42%
Ground Floor	62.15	62.15	0.00%
Consequence	> $C_{m,M}$	< $C_{m,L}$	**$C_{m,M}$ > $C_{m,L}$**

Tabella 72: Palermo, Capacità Termica Interna Areica degli Elementi di Involucro (Piano Terra)

Areal Internal Heat Capacity k_J [kJ/m^{2}K] (First Floor)			
Case Study 2			
	Massive Structure	Lightweight Structure	Percentage Increase %
External Wall	40.55	22.79	77.92%
Internal Wall	50.99	30.50	67.18%
Internal Floor	77.37	78.48	-1.42%
Sub-Roofing Floor (Isolated)	58.45	4.20	1292.95%
Consequence	>>> $C_{m,M}$	<<< $C_{m,L}$	**$C_{m,M}$ >>> $C_{m,L}$**
Case Study 3			
	Massive Structure	Lightweight Structure	Percentage Increase %
External Wall	40.55	22.79	77.92%
Internal Wall	50.99	30.50	67.18%
Internal Floor	77.37	78.48	-1.42%
Sub-Roofing Floor (Not Isolated)	32.52	7.54	331.41%
Consequence	>> $C_{m,M}$	<< $C_{m,L}$	**$C_{m,M}$ >> $C_{m,L}$**

Tabella 73: Palermo, Capacità Termica Interna Areica degli Elementi di Involucro (Piano Primo)

Per ogni elemento la capacità termica interna areica risulta superiore nella struttura massiva rispetto alla struttura leggera, questo significa che a parità di ricambi d'aria (quindi per $H_{ve,adj}$ costante) la costante di tempo associata alla struttura massiva sarà sicuramente superiore rispetto alla costante di tempo associata alla struttura leggera (si ricordi che poiché le trasmittanze termiche degli elementi massivi e leggeri sono circa uguali tra loro anche $H_{tr,adj}$ sarà costante). Le caratteristiche degli elementi del piano terra coincidono sia nel caso studio 2 che nel caso studio 3, questo si verifica poiché la differenza tra le due tipologie di edificio è data solo dall'isolamento del solaio di sottotetto. Ciò comporterà che le costanti di tempo associate al piano terra del caso studio 2 e del caso studio 3 coincideranno tra loro e quindi si otterranno gli stessi risultati riguardo la variazione dei parametri. Di nuovo, l'unica struttura del piano primo a variare è il solaio di sottotetto.

5.1.1.3.1 Caso Studio 2: Solaio di Sottotetto Isolato con Copertura non Isolata

Case Study 2			
Tipe of Structure	Time Constant [h]	$H_{tr,adj}$ [W/K]	$H_{ve,adj}$ [W/K]
[-]	[h]	[W/K]	[W/K]
Ground Floor			
Massive Structure n=0,50	52.00	69.46	15.90
Massive Structure n=0,10	61.10	69.46	3.18
Lightweight Structure n=0,50	39.00	75.41	15.90
Lightweight Structure n=0,10	45.31	75.41	3.18
First Floor			
Massive Structure n=0,50	55.50	68.24	15.73
Massive Structure n=0,10	61.32	68.24	3.15
Lightweight Structure n=0,50	31.21	73.41	15.73
Lightweight Structure n=0,10	34.13	73.41	3.15

Tabella 74: Costante di Tempo e Coefficienti di Scambio Termico per Trasmissione e Ventilazione al Variare della Tipologia di Struttura e dei Ricambi di Aria (Caso Studio 2)

Una differenza che è possibile notare rispetto al caso di Milano e Roma è l'aumento dei coefficienti di scambio termico per trasmissione $H_{tr,adj}$. Questo, oltre al cambiamento di località climatica, è dovuto al fatto che gli elementi dell'involucro hanno trasmittanze termiche superiori rispetto sia agli elementi riferiti alla località di Milano sia a quelli riferiti alla località di Roma. Come nei casi precedenti, per ogni zona termica sono state realizzate due tipologie di grafici: nel primo sono riportate le costanti di tempo della struttura massiva e leggera al variare di n, mentre nel secondo sono riportate le costanti di tempo al variare della tipologia di struttura, mantenendo fisso n.

- Piano Terra

Analizzando il grafico 108 (analisi della costante di tempo in funzione della variazione di n) è possibile notare che sia nel caso di struttura massiva che nel caso di struttura leggera la variazione di n dal valore di 0,50 al valore di 0,10 comporta un aumento della costante di tempo. Come già evidenziato una diminuzione del valore di n comporta una diminuzione del coefficiente di scambio termico per la ventilazione, che nell'equazione della costante di tempo si trova al denominatore. La riduzione del coefficiente $H_{ve,adj}$, a parità di capacità termica interna C_m e di coefficiente di scambio termico per trasmissione $H_{tr,adj}$ (perché si sta mantenendo fissa la tipologia di struttura), comporta un aumento della costante di tempo, che in questo caso è di circa il 17%.

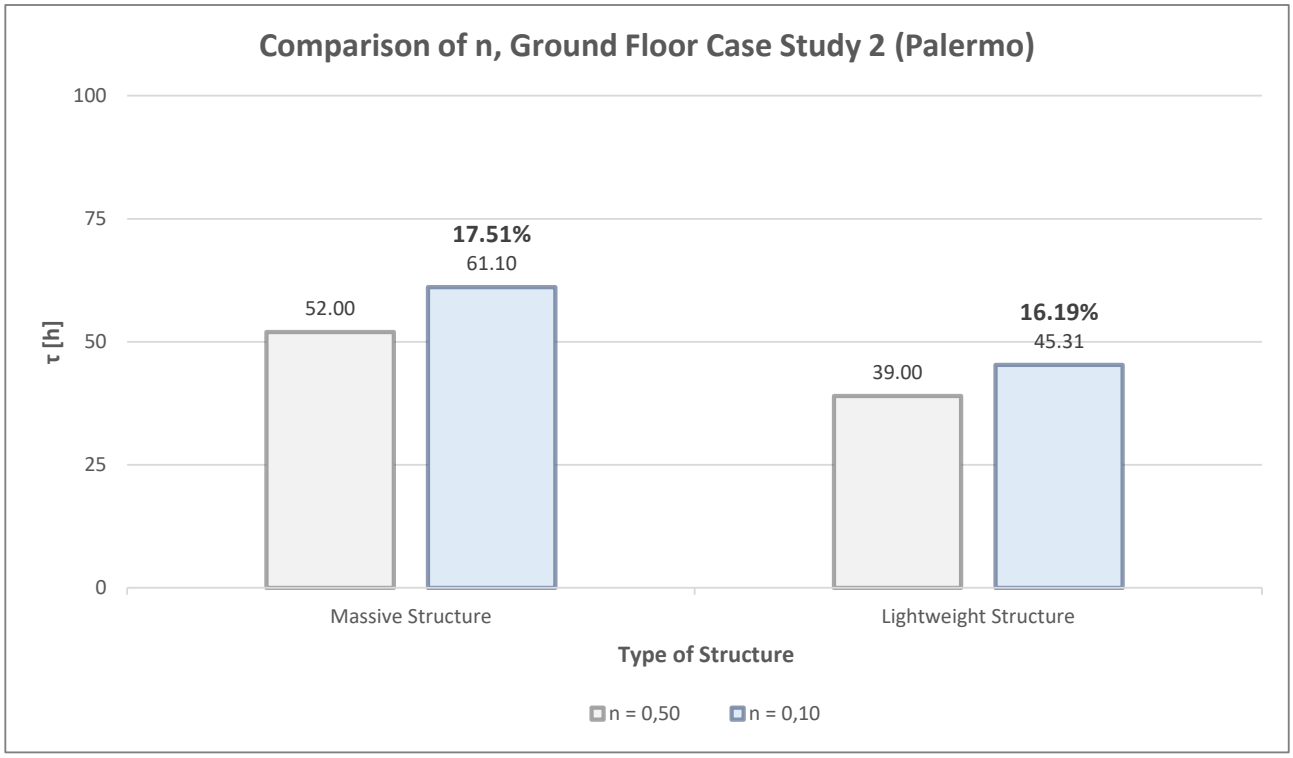

Grafico 108: Valore della Costante di Tempo al Variare di n [1/h] (Caso Studio 2, Piano Terra)

Analizzando il grafico 109 (analisi della costante di tempo in funzione della tipologia di struttura) si nota come sia nel caso di n pari a 0,50 sia nel caso di n pari a 0,10 la struttura massiva risulti avere una costante di tempo maggiore rispetto alla struttura leggera. In questo caso sarà il valore della capacità termica interna C_m a variare, mantenendo costanti i coefficienti di scambio termico per trasmissione e ventilazione (le trasmittanze termiche delle strutture leggere sono molto simili a quelle delle strutture massive, mentre n è stato fissato in modo tale che l'unico valore a variare sarà proprio C_m). In questo caso la variazione da struttura leggera a massiva comporta un aumento della costante di tempo di circa il 34%.

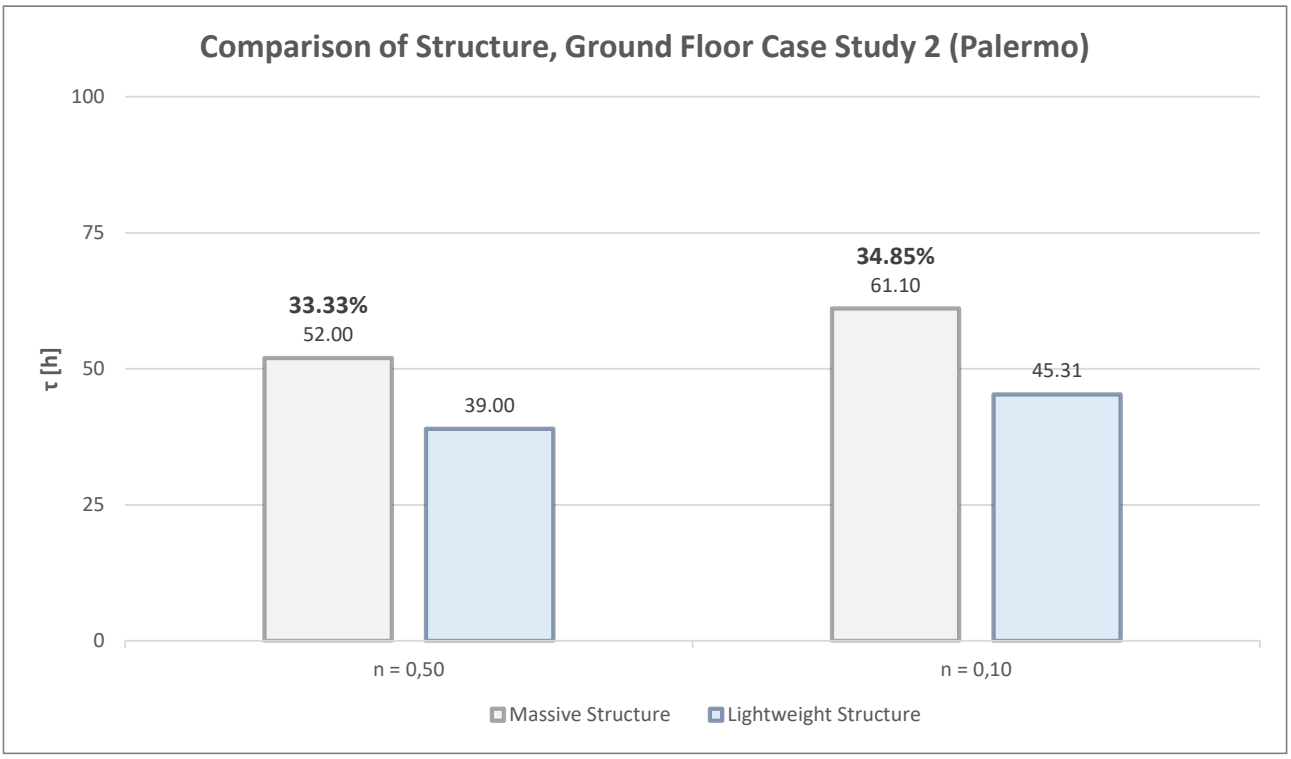

Grafico 109: Valore della Costante di Tempo al Variare della Tipologia di Struttura (Caso Studio 2, Piano Terra

Confrontando i due grafici la variazione percentuale maggiore della costante di tempo è attribuibile alla variazione di struttura, quindi nel calcolo della costante di tempo associata al piano terra del caso studio 2 avrà un maggior peso la variazione di struttura rispetto alla variazione di n. Questo comportamento inverso rispetto alle località precedentemente studiate è dovuto all'elevato coefficiente di scambio termico per trasmissione: avendo al denominatore una quantità già elevata ($H_{tr,adj}$) la variazione del coefficiente di scambio termico per ventilazione avrà un'incidenza molto minore sulla costante di tempo.

- Piano Primo

Il comportamento della variazione della costante di tempo segue lo stesso andamento già evidenziato per il piano terra, ovvero al diminuire di n la costante di tempo aumenta, come aumenta passando dalla struttura leggera a quella massiva. L'unica differenza rispetto alla zona termica precedente sono le percentuali di incremento della costante di tempo, in questo caso si nota come pesi in modo nettamente superiore il passaggio dalla struttura leggera alla struttura massiva (a parità di n) rispetto alla variazione di n (a parità di tipologia di struttura). Osservando la tabella 72 è possibile individuare la motivazione di tale risultato. Al piano primo è presente il solaio di sottotetto che risulta avere una notevole differenza di capacità termica interna areica tra la struttura massiva e quella leggera, mentre al piano terra è presente il solaio contro-terra che si mantiene fisso per entrambe le tipologie di struttura. Questo porta ad avere, per il primo piano, un incremento di capacità termica interna C_m tra struttura leggera e struttura massiva molto superiore rispetto all'incremento di capacità termica interna che si ha nel piano terra. Ciò significa che aumentando di molto la capacità termica interna C_m la riduzione del coefficiente di scambio termico per ventilazione $H_{ve,adj}$ comincerà a pesare meno, ed è proprio ciò che si verifica in questo caso. Quindi nel calcolo della costante di tempo associata al piano primo del caso studio 2 avrà un maggior peso la variazione di struttura piuttosto che la variazione di n.

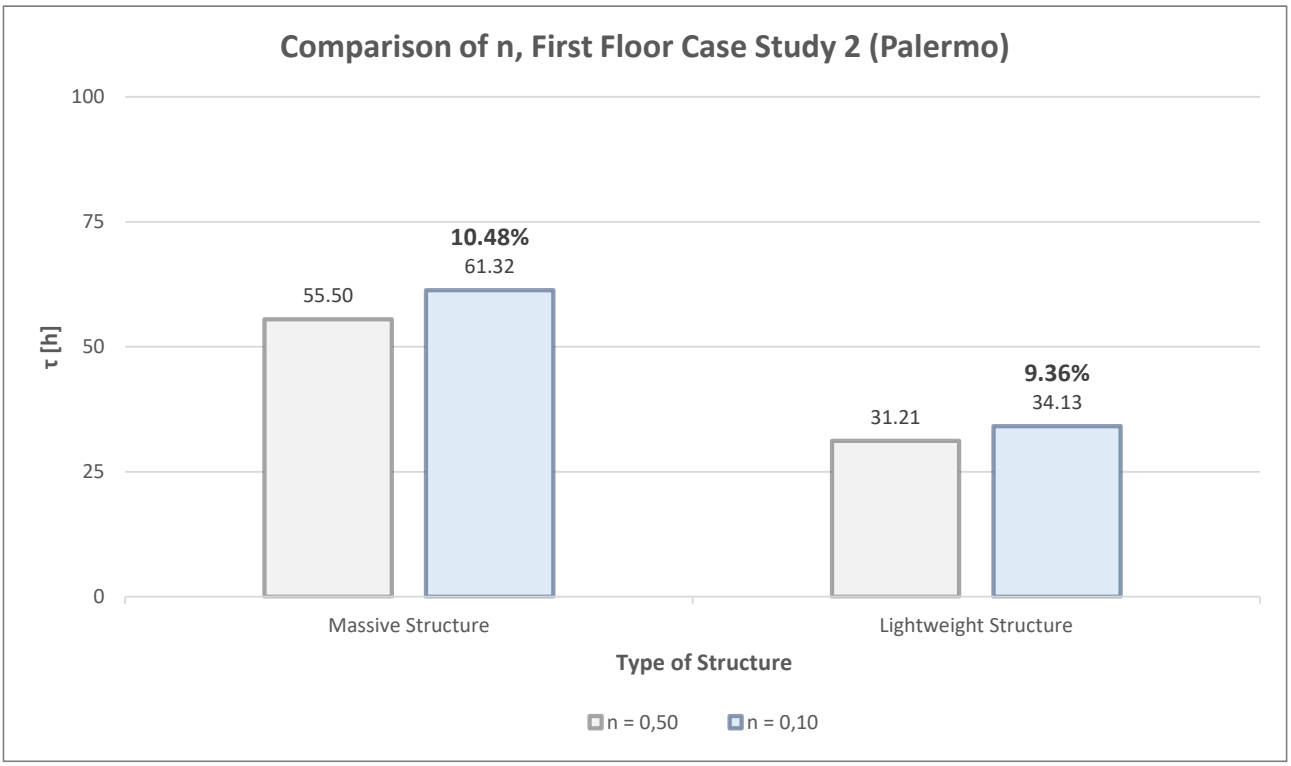

Grafico 110: Valore della Costante di Tempo al Variare di n [1/h] (Caso Studio 2, Piano Primo)

Si torna ad avere un incremento percentuale passando da una struttura leggera ad una struttura massiva molto elevato, come nel caso di Milano e a differenza del caso di Roma. Questo accade poiché la capacità termica interna areica del solaio di sottotetto del caso studio 2 a Palermo torna ad essere molto più elevata (58,45 kJ/m2K) e quindi molto più rilevante nel calcolo della costante di tempo.

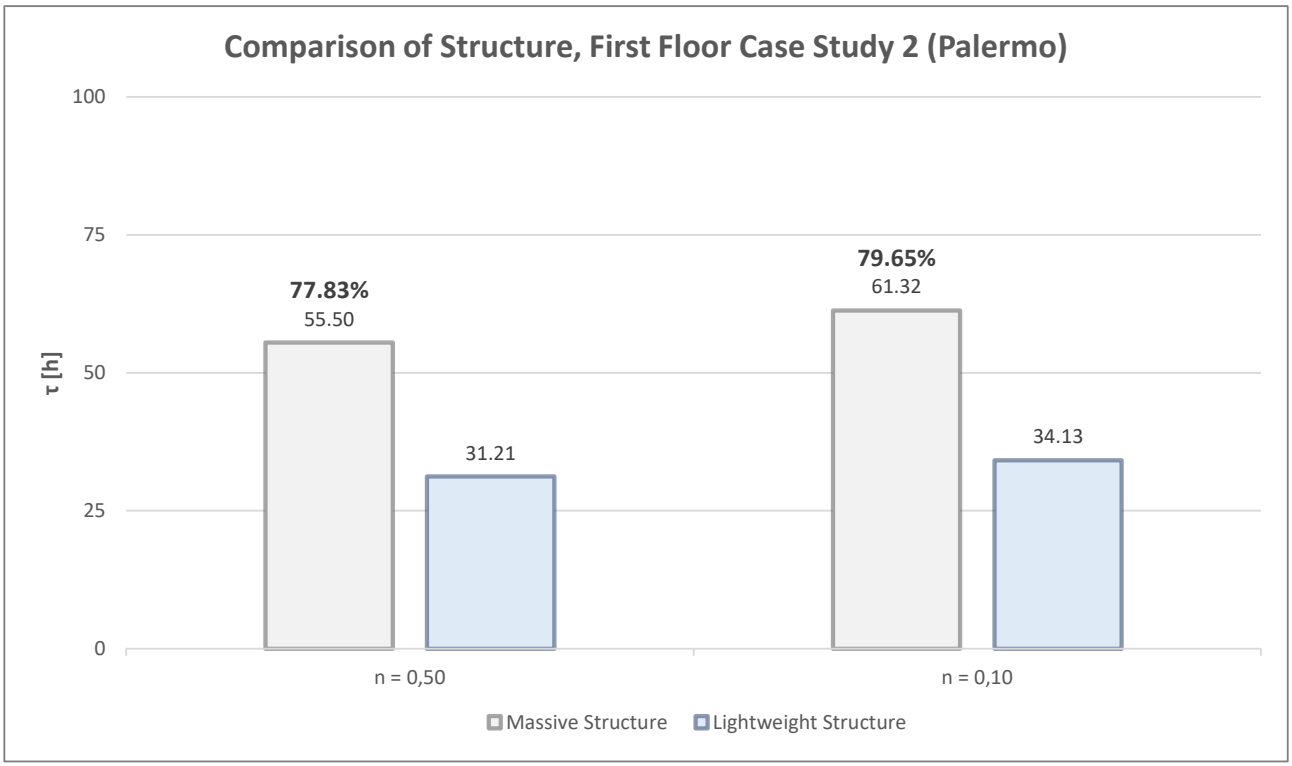

Grafico 111: Valore della Costante di Tempo al Variare della Tipologia di Struttura (Caso Studio 2, Piano Primo)

5.1.1.3.2 Caso Studio 3: Solaio di Sottotetto non Isolato con Copertura Isolata

Case Study 3			
Tipe of Structure	Time Constant [h]	$H_{tr,adj}$ [W/K]	$H_{ve,adj}$ [W/K]
[-]	[h]	[W/K]	[W/K]
Ground Floor			
Massive Structure n=0,50	52.00	69.46	15.90
Massive Structure n=0,10	61.10	69.46	3.18
Lightweight Structure n=0,50	39.00	75.41	15.90
Lightweight Structure n=0,10	45.31	75.41	3.18
First Floor			
Massive Structure n=0,50	46.54	75.39	15.73
Massive Structure n=0,10	54.00	75.39	3.15
Lightweight Structure n=0,50	29.33	80.96	15.73
Lightweight Structure n=0,10	33.72	80.96	3.15

Tabella 75: Costante di Tempo e Coefficienti di Scambio Termico per Trasmissione e Ventilazione al Variare della Tipologia di Struttura e dei Ricambi di Aria (Caso Studio 3)

- Piano Terra

Come anticipato in precedenza, i risultati associati al piano terra di questo caso studio coincidono esattamente con i risultati studiati per il piano terra del caso studio 2. Questo si verifica poiché le tipologie di edificio identificate dai due casi studio non differiscono in nessun elemento nel piano terra, a differenza del piano primo dove è presente un solaio di sottotetto che nel caso studio 2 risulta essere isolato mentre nel caso studio 3 risulta essere non isolato.

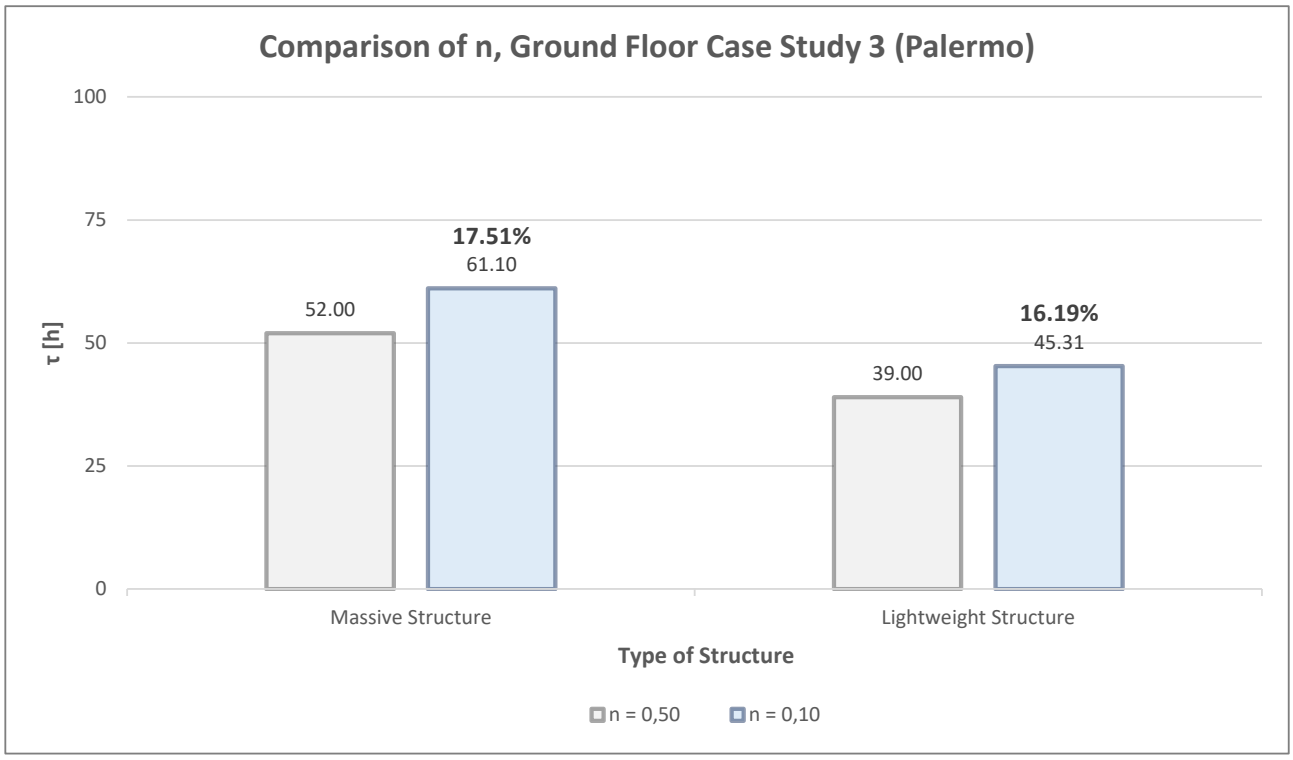

Grafico 112: Valore della Costante di Tempo al Variare di n [1/h] (Caso Studio 3, Piano Terra)

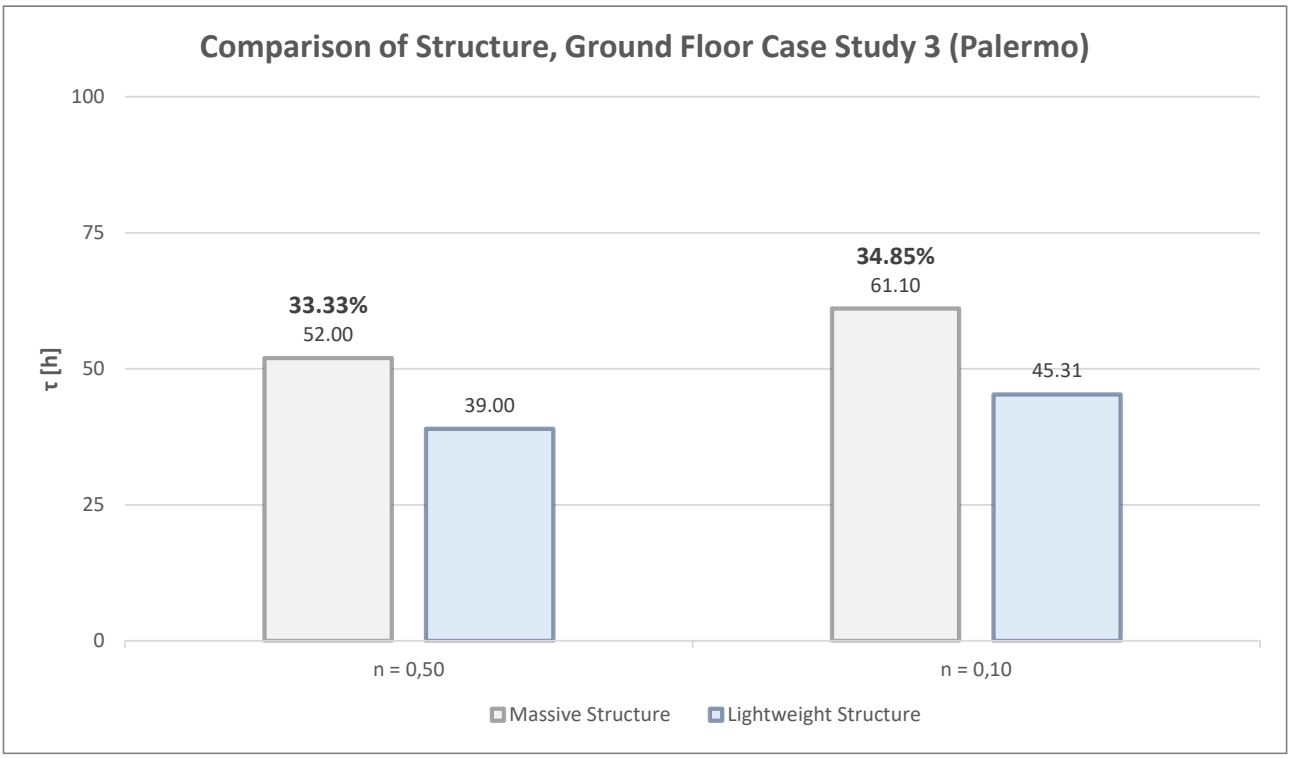

Grafico 113: Valore della Costante di Tempo al Variare della Tipologia di Struttura (Caso Studio 3, Piano Terra)

- Piano Primo

Il comportamento della variazione della costante di tempo segue lo stesso andamento già evidenziato per il piano primo riferito al caso studio 2, ovvero al diminuire di n la costante di tempo aumenta, come aumenta passando dalla struttura leggera a quella massiva, inoltre nel calcolo della costante di tempo avrà un maggior peso la variazione di struttura piuttosto che la variazione di n. L'unica differenza rispetto al piano primo del caso studio 2 è riscontrabile nell'incremento percentuale della costante di tempo nel passaggio dalla struttura leggera alla struttura massiva. In questo caso la percentuale è molto ridotta rispetto a quella che si ha nel piano primo del caso studio precedente, questo è dovuto al fatto che la struttura massiva del solaio di sottotetto non isolato ha una capacità termica interna areica minore rispetto alla struttura massiva del solaio di sottotetto isolato (tabella 73), inoltre il solaio non isolato avrà una trasmittanza termica maggiore rispetto al solaio isolato, questo comporta un aumento del coefficiente di scambio termico per trasmissione $H_{tr,adj}$. Il confronto del piano primo tra i due casi studio verrà affrontato nell'analisi 2, queste osservazioni hanno lo scopo di motivare i diversi incrementi percentuali.

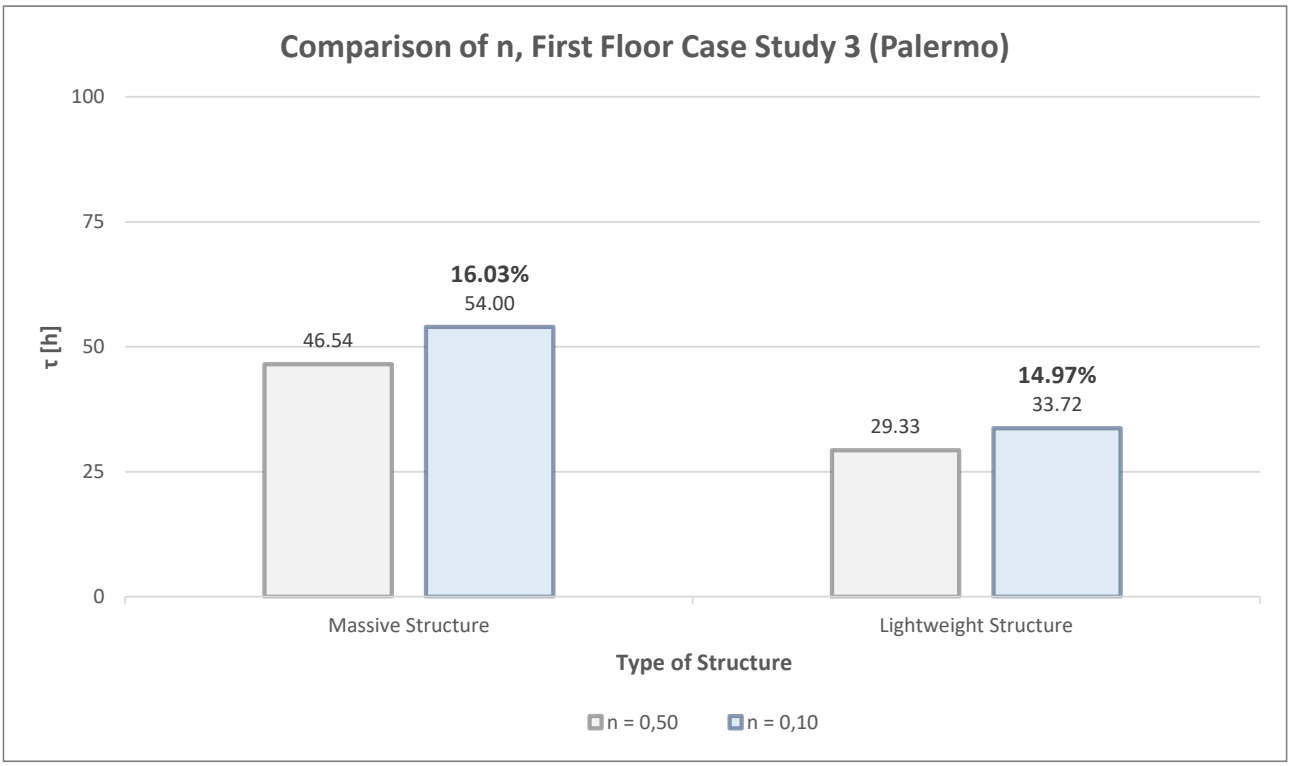

Grafico 114: Valore della Costante di Tempo al Variare di n [1/h] (Caso Studio 3, Piano Primo)

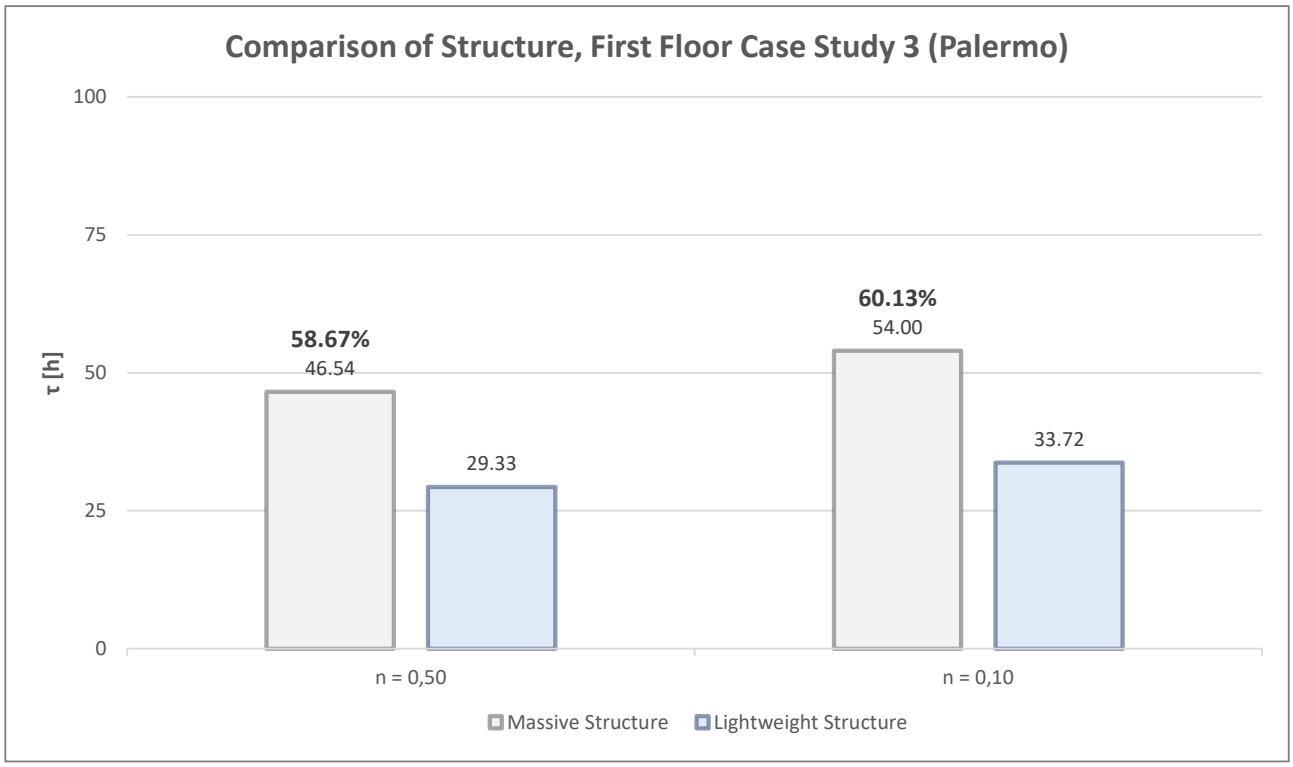

Grafico 115: Valore della Costante di Tempo al Variare della Tipologia di Struttura (Caso Studio 3, Piano Primo)

5.1.2 Analisi 2: Valutazione della Costante di Tempo Associata al Primo Piano in Funzione della Tipologia di Solaio di Sottotetto

In questa seconda analisi si andrà a valutare ciò che accade variando la tipologia di solaio di sottotetto mantenendo il valore di n costante (l'influenza del valore di n è stata studiata nell'analisi precedente), quindi sarà un'analisi comparativa riguardante la zona termica del piano primo associata al caso studio 2 e al caso studio 3. Per ogni località saranno riportate le diverse caratteristiche, in termini di trasmittanza termica e di capacità termica interna areica, tra le due tipologie di solaio. Si evidenziano le sole caratteristiche del solaio di sottotetto poiché le restanti strutture rimangono costanti nei due casi studio, che differiscono tra loro solamente a causa della diversa tipologia di solaio. Questo significa che la variazione della costante di tempo associata al primo piano tra un caso studio e l'altro sarà influenzata esclusiva dalla tipologia di solaio di sottotetto.

5.1.2.1 Milano

Thermal Transmittance U [W/m^{2}K](First Floor)			
	Case Study 2	Case Study 3	Percentage Increase %
Sub-Roofing Floor	0.24	1.24	-80.31%
Consequence	< $H_{tr,adj,2}$	> $H_{tr,adj,3}$	**$H_{tr,adj,3} > H_{tr,adj,2}$**
Areal Internal Heat Capacity k_J [kJ/m^{2}K] (First Floor) Massive Structure			
	Case Study 2	Case Study 3	Percentage Increase %
Sub-Roofing Floor	58.05	32.52	78.55%
Consequence	> $C_{m,M2}$	< $C_{m,M3}$	**$C_{m,M2} > C_{m,M3}$**
Areal Internal Heat Capacity k_J [kJ/m^{2}K] (First Floor) Lightweight Structure			
	Case Study 2	Case Study 3	Percentage Increase %
Sub-Roofing Floor	5.96	7.54	-20.88%
Consequence	< $C_{m,L2}$	> $C_{m,L3}$	**$C_{m,L2} < C_{m,L3}$**

Tabella 76: Trasmittanza Termica e Capacità Termica Interna Areica del Solaio di Sottotetto (Caso Studio 2 e 3)

Il solaio non isolato (caso studio 3) ha una trasmittanza termica maggiore rispetto al solaio isolato (caso studio 2). Questo comporta, a parità di capacità termica interna C_m e di coefficiente di scambio termico per ventilazione $H_{ve,adj}$, un aumento nel caso studio 3 del coefficiente di scambio termico per trasmissione $H_{tr,adj}$ e quindi una diminuzione della costante di tempo rispetto al caso studio 2.

La capacità termica interna areica della struttura massiva del caso studio 2 è più elevata rispetto a quella della struttura massiva del caso studio 3, questo comporta una capacità termica interna C_m maggiore nel caso studio 2 rispetto al caso studio 3. Ciò significa che, a parità di coefficiente globale di scambio termico, la costante di tempo associata al caso studio 2 sarà maggiore rispetto alla costante di tempo associata al caso studio 3.

La capacità termica interna areica della struttura leggera del caso studio 2 è minore rispetto a quella della struttura leggera del caso studio 3, questo comporta una capacità termica interna C_m minore nel caso studio 2 rispetto al caso studio 3. Ciò significa che, a parità di coefficiente globale di scambio termico, la costante di tempo associata al caso studio 2 sarà minore rispetto alla costante di tempo associata al caso studio 3.

Unendo le osservazioni appena riportate è possibile affermare che nel caso di struttura massiva sicuramente la costante di tempo maggiore è associata al caso studio 2, poiché si ha una capacità termica interna più elevata e un coefficiente di scambio termico per trasmissione minore rispetto al caso studio 3, mentre nel

caso di struttura leggera non è possibile definire a priori quale costante di tempo sarà maggiore. Questo perché se da un lato nel caso studio 3 si ha una capacità termica interna più elevata, dall'altro anche il coefficiente di scambio termico per trasmissione è più elevato, non è possibile quindi stabilire solo osservando queste caratteristiche quale costante di tempo tra i due casi studio sarà maggiore nel caso di struttura leggera.

First Floor	
Massive Structure	
$C_{m,M2} > C_{m,M3}$	$\Rightarrow \tau_2 > \tau_3$
$H_{tr,adj,M2} < H_{tr,adj,M3}$	
Lightweight Structure	
$C_{m,L2} < C_{m,L3}$	$\Rightarrow \tau_2 \ ? \ \tau_3$
$H_{tr,adj,L2} < H_{tr,adj,L3}$	

Tabella 77: Riassunto Osservazioni sulla Costante di Tempo Analizzando Solo le Caratteristiche delle Due Tipologie di Solaio

Dal seguente grafico è possibile notare che, come già anticipato, la costante di tempo associata alla struttura massiva del caso studio 2 è più elevata rispetto alla costante di tempo associata sempre alla struttura massiva ma del caso studio 3. Lo stesso comportamento si verifica nella struttura leggera ma con un incremento percentuale minore. Questo significa che, nel caso di struttura leggera, l'aumento del coefficiente di scambio termico per trasmissione nel caso studio 3 pesa in modo maggiore rispetto all'aumento di capacità termica interna, ma, poiché quest'ultima aumenta, l'incremento percentuale tra un caso studio e l'altro è minore rispetto alla struttura massiva dove invece l'aumento della capacità termica interna si ha nel caso studio 2 e non nel caso studio 3.

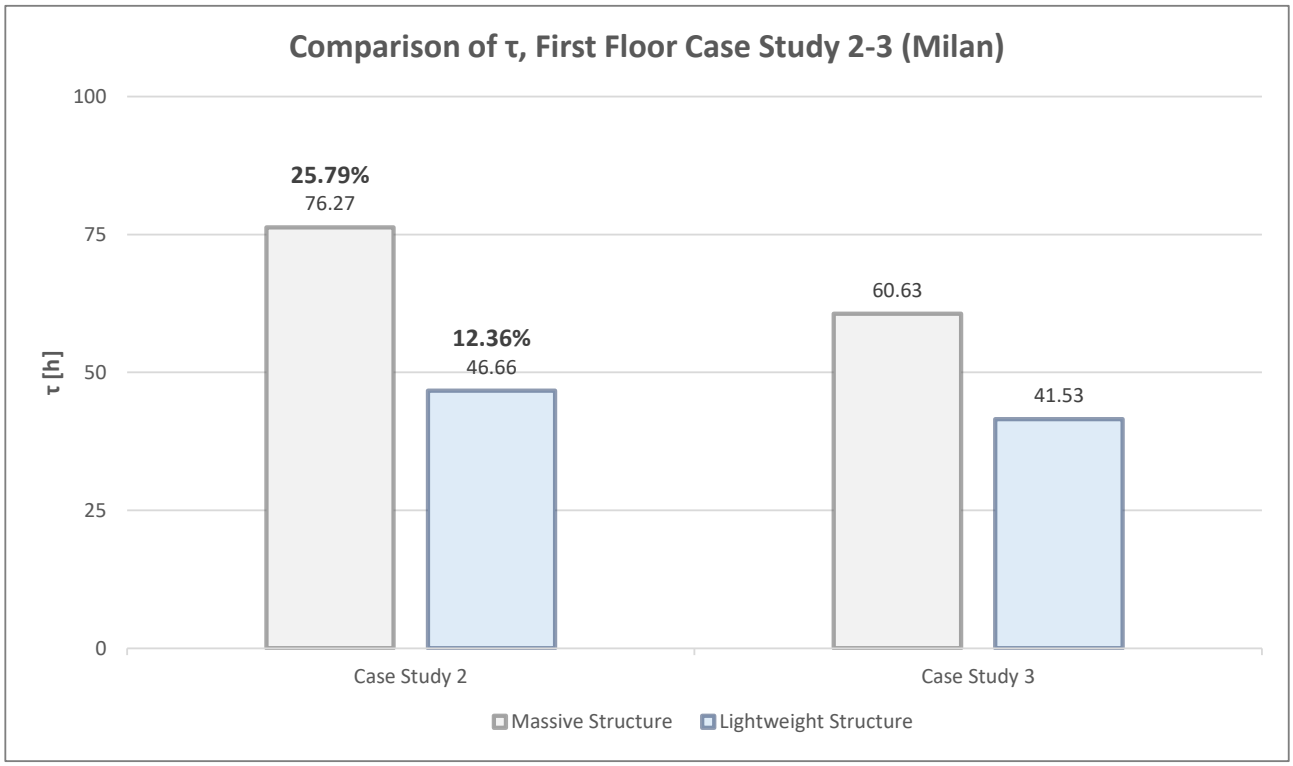

Grafico 116: Valore della Costante di Tempo del Piano Primo al Variare del Caso Studio

5.1.2.2 Roma

Thermal Transmittance U [W/m^{2}K](First Floor)			
	Case Study 2	Case Study 3	Percentage Increase %
Sub-Roofing Floor	0.26	1.24	-79.02%
Consequence	$< H_{tr,adj,2}$	$> H_{tr,adj,3}$	$\mathbf{H_{tr,adj,3} > H_{tr,adj,2}}$
Areal Internal Heat Capacity k_J [kJ/m^{2}K] (First Floor) Massive Structure			
	Case Study 2	Case Study 3	Percentage Increase %
Sub-Roofing Floor	34.40	32.52	5.80%
Consequence	$> C_{m,M2}$	$< C_{m,M3}$	$\mathbf{C_{m,M2} > C_{m,M3}}$
Areal Internal Heat Capacity k_J [kJ/m^{2}K] (First Floor) Lightweight Structure			
	Case Study 2	Case Study 3	Percentage Increase %
Sub-Roofing Floor	5.24	7.54	-30.48%
Consequence	$< C_{m,L2}$	$> C_{m,L3}$	$\mathbf{C_{m,L2} < C_{m,L3}}$

Tabella 78: Trasmittanza Termica e Capacità Termica Interna Areica del Solaio di Sottotetto (Caso Studio 2 e 3)

Le osservazioni sulle caratteristiche delle strutture precedentemente riportate per Milano possono essere estese per la località di Roma.

First Floor	
Massive Structure	
$C_{m,M2} > C_{m,M3}$	$\Rightarrow \tau_2 > \tau_3$
$H_{tr,adj,M2} < H_{tr,adj,M3}$	
Lightweight Structure	
$C_{m,L2} < C_{m,L3}$	$\Rightarrow \tau_2 \ ? \ \tau_3$
$H_{tr,adj,L2} < H_{tr,adj,L3}$	

Tabella 79: Riassunto Osservazioni sulla Costante di Tempo Analizzando Solo le Caratteristiche delle Due Tipologie di Solaio

Dal seguente grafico è possibile notare che la costante di tempo associata alla struttura massiva del caso studio 2 è più elevata rispetto alla costante di tempo associata sempre alla struttura massiva ma del caso studio 3. Lo stesso comportamento si verifica nella struttura leggera con un incremento percentuale simile alla struttura massiva, a differenza di Milano dove l'incremento percentuale era minore. Si hanno percentuali di incremento simili perché l'aumento di capacità termica interna areica tra le due tipologie di solaio della struttura massiva è molto più contenuto rispetto a quello che si verifica a Milano, quindi la variazione del coefficiente di scambio termico per trasmissione peserà in modo simile sulla costante di tempo sia nella struttura leggera che nella struttura massiva.

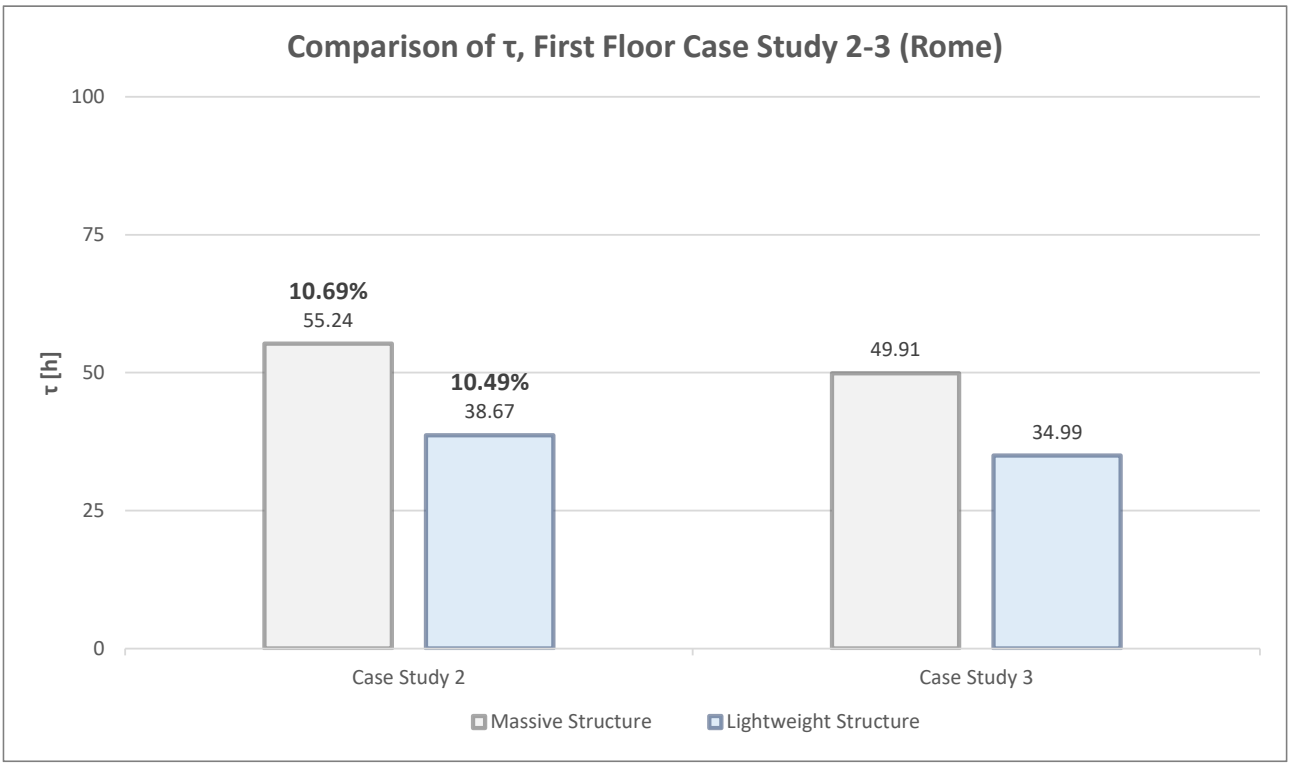

Grafico 117: Valore della Costante di Tempo del Piano Primo al Variare del Caso Studio

5.1.2.3 Palermo

.

Thermal Transmittance U [W/m^{2}K](First Floor)			
	Case Study 2	Case Study 3	Percentage Increase %
Sub-Roofing Floor	0.36	1.24	-70.86%
Consequence	< $H_{tr,adj,2}$	> $H_{tr,adj,3}$	**$H_{tr,adj,3}$ > $H_{tr,adj,2}$**
Areal Internal Heat Capacity k_J [kJ/m^{2}K] (First Floor) Massive Structure			
	Case Study 2	Case Study 3	Percentage Increase %
Sub-Roofing Floor	58.45	32.52	79.76%
Consequence	> $C_{m,M2}$	< $C_{m,M3}$	**$C_{m,M2}$ > $C_{m,M3}$**
Areal Internal Heat Capacity k_J [kJ/m^{2}K] (First Floor) Lightweight Structure			
	Case Study 2	Case Study 3	Percentage Increase %
Sub-Roofing Floor	4.20	7.54	-44.33%
Consequence	< $C_{m,L2}$	> $C_{m,L3}$	**$C_{m,L2}$ < $C_{m,L3}$**

Tabella 80: Trasmittanza Termica e Capacità Termica Interna Areica del Solaio di Sottotetto (Caso Studio 2 e 3)

Le osservazioni sulle caratteristiche delle strutture precedentemente riportate per Milano e Roma possono essere estese per la località di Palermo.

First Floor	
Massive Structure	
$C_{m,M2} > C_{m,M3}$	$\Rightarrow \tau_2 > \tau_3$
$H_{tr,adj,M2} < H_{tr,adj,M3}$	
Lightweight Structure	
$C_{m,L2} < C_{m,L3}$	$\Rightarrow \tau_2 \ ? \ \tau_3$
$H_{tr,adj,L2} < H_{tr,adj,L3}$	

Tabella 81: Riassunto Osservazioni sulla Costante di Tempo Analizzando Solo le Caratteristiche delle Due Tipologie di Solaio

Dal seguente grafico è possibile notare che la costante di tempo associata alla struttura massiva del caso studio 2 è più elevata rispetto alla costante di tempo associata sempre alla struttura massiva ma del caso studio 3. Lo stesso comportamento si verifica nella struttura leggera ma con un incremento percentuale minore, come per Milano. Questo significa che, nel caso di struttura leggera, l'aumento del coefficiente di scambio termico per trasmissione nel caso studio 3 pesa in modo maggiore rispetto all'aumento di capacità termica interna, ma, poiché quest'ultima aumenta, l'incremento percentuale tra un caso studio e l'altro è minore rispetto alla struttura massiva dove invece l'aumento della capacità termica interna si ha nel caso studio 2 e non nel caso studio 3.

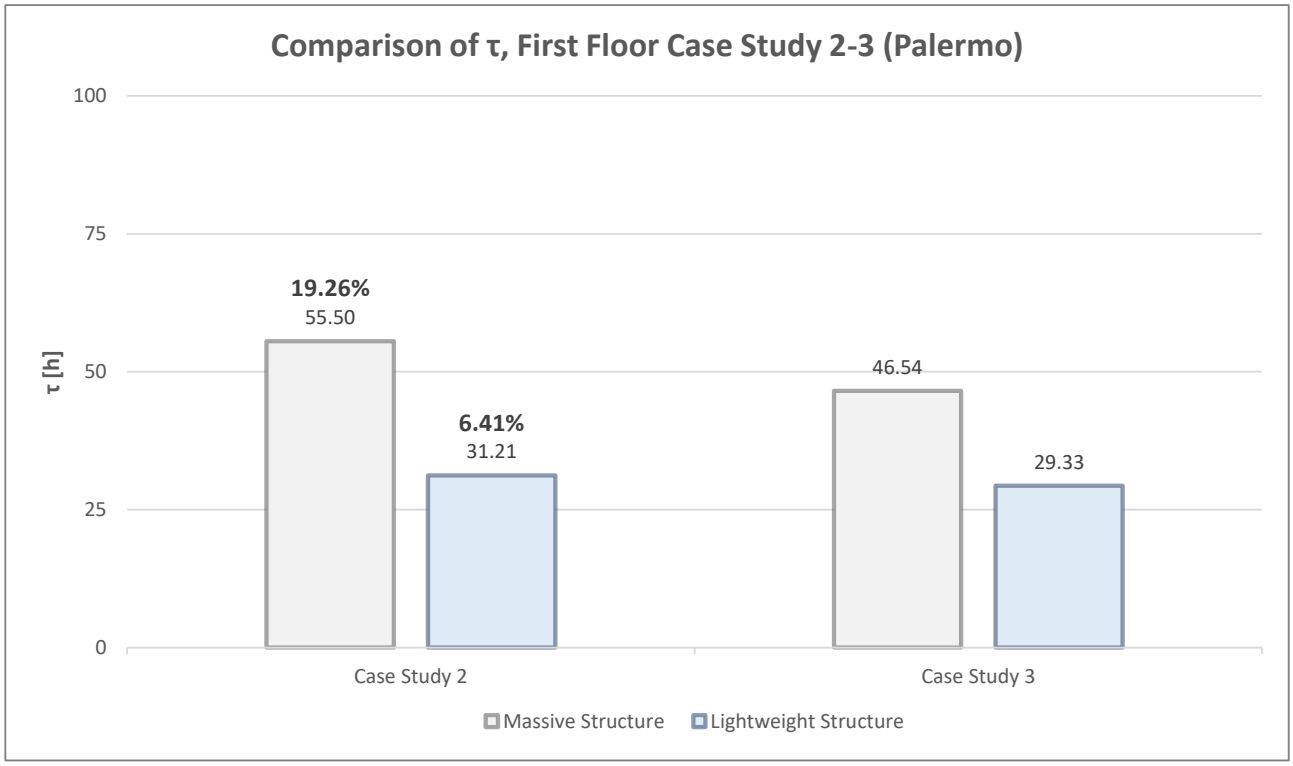

Grafico 118: Valore della Costante di Tempo del Piano Primo al Variare del Caso Studio

5.1.3 Analisi della Variazione dei Coefficienti di Scambio Termico per Trasmissione e Ventilazione

Un'ulteriore analisi è stata effettuata sulla variazione dei due coefficienti di scambio termico in funzione dei parametri che li influenzano. Come già specificato il coefficiente di scambio termico per ventilazione è influenzato dal solo valore di n (poiché ad ogni piano il volume interno tra i due casi studio rimane costante),

mentre il coefficiente di scambio termico per trasmissione è influenzato dalla tipologia di solaio di sottotetto (varierà solo al primo piano poiché al piano terra le strutture tra i due casi studio rimangono costanti). Dai seguenti grafici è possibile notare che: il coefficiente di scambio termico per ventilazione diminuisce dell'80% passando da un valore di n pari a 0,50 ad un valore pari a 0,10, mentre il coefficiente di scambio termico per trasmissione aumenta passando da un solaio di sottotetto isolato ad un solaio di sottotetto non isolato (questo accade a causa dell'aumento del valore della trasmittanza termica). Per le località di Roma e Palermo, l'incremento del coefficiente di scambio termico per trasmissione dal caso studio 2 al caso studio 3 risulta minore rispetto a quanto osservato a Milano, ciò è dovuto al fatto che la differenza tra la trasmittanza termica del solaio non isolato e la trasmittanza termica del solaio isolato è minore a Roma e a Palermo rispetto che a Milano, poiché i solai di sottotetto isolati in queste due località hanno trasmittanze termiche superiori al solaio di sottotetto isolato a Milano.

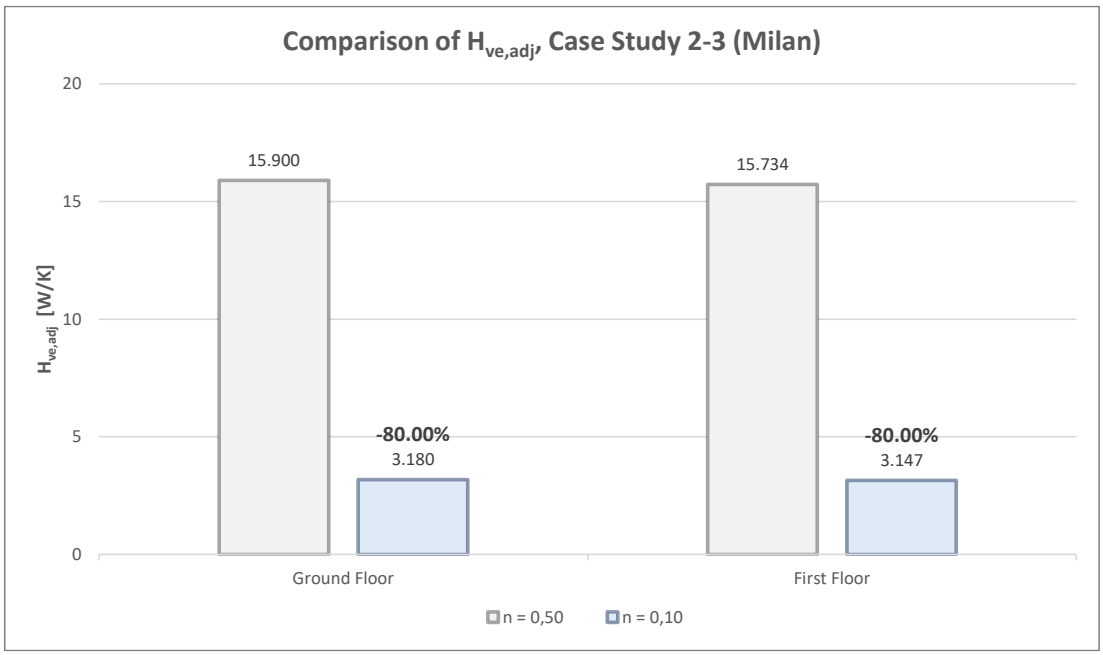

Grafico 119: Variazione del Coefficiente di Scambio Termico per Ventilazione al Variare del Valore di n [1/h] (Per Tutte le Località)

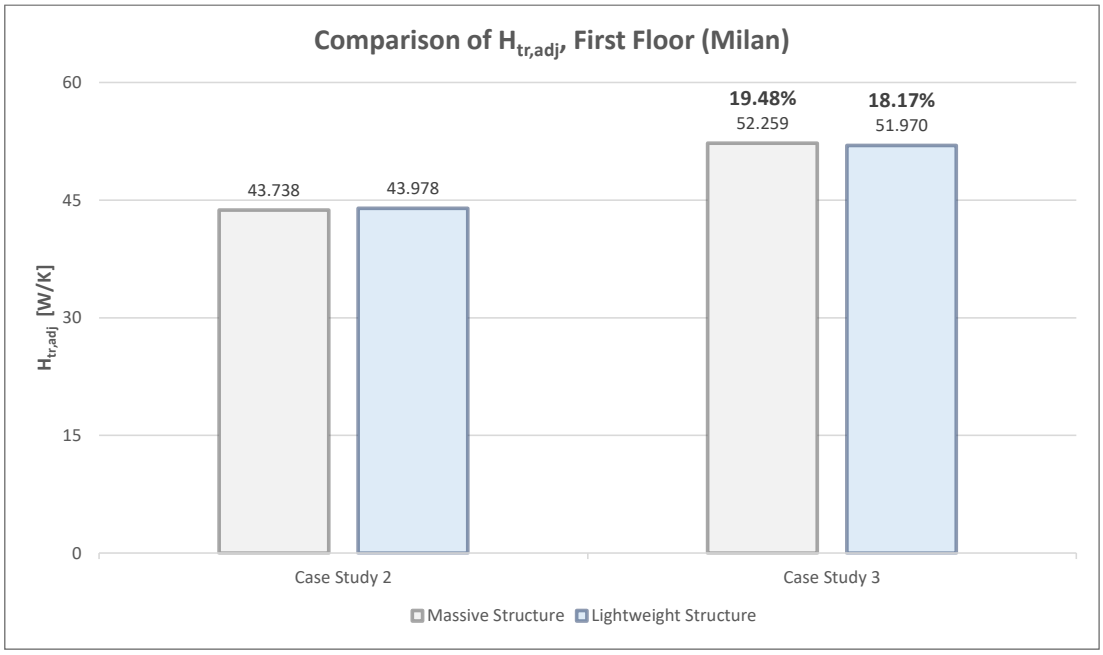

Grafico 120: Variazione del Coefficiente di Scambio Termico per Trasmissione al Variare della Tipologia di Solaio (Milano)

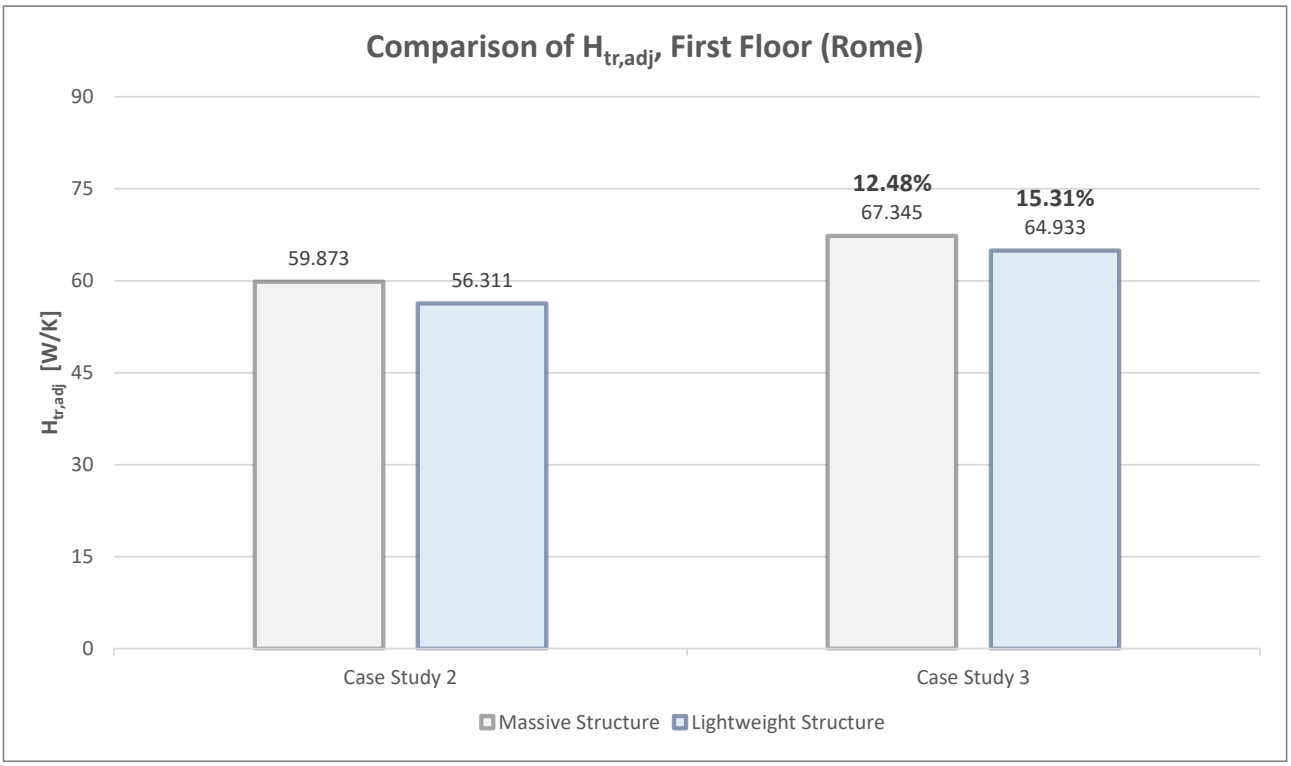

Grafico 121: Variazione del Coefficiente di Scambio Termico per Trasmissione al Variare della Tipologia di Solaio (Roma)

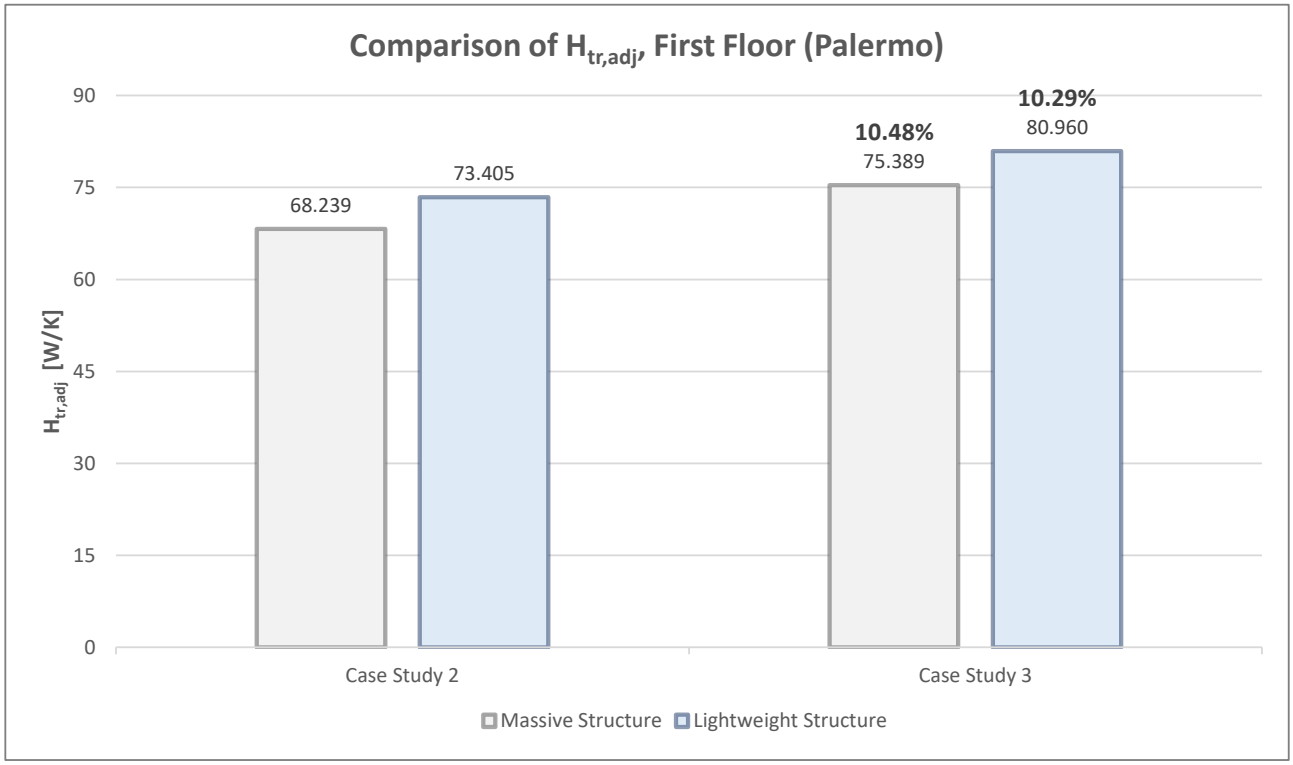

Grafico 122: Variazione del Coefficiente di Scambio Termico per Trasmissione al Variare della Tipologia di Solaio (Palermo)

Un ulteriore osservazione può essere evidenziata andando a valutare i valori assunti dai coefficienti di scambio termico. Pur passando ad un valore di n cinque volte maggiore, il coefficiente di scambio termico per ventilazione risulta pari a circa 15 W/K, mentre i vari coefficienti di scambio termico per trasmissione

sono molto più elevati, anche quelli associati a Milano che risultano essere i minori fra tutti. Trovandosi entrambi i coefficienti al denominatore dell'equazione utilizzata per la determinazione della costante di tempo, sicuramente il coefficiente di scambio termico che avrà più peso sarà $H_{tr,adj}$ poiché risulta sempre essere molto superiore rispetto a $H_{ve,adj}$. Maggiore è il coefficiente di scambio termico per trasmissione e minore sarà l'influenza sulla costante di tempo del coefficiente di scambio termico per ventilazione. Per questo, in relazione alla costante di tempo, negli edifici poco isolati (trasmittanze termiche elevate e quindi coefficiente di scambio termico elevato) la ventilazione ricopre un ruolo meno importante rispetto agli edifici fortemente isolati.

5.1.4 Fattore di Utilizzazione e Costante di Tempo

I fabbisogni di energia utile per il riscaldamento e il raffrescamento sono stati determinati mediante il metodo di calcolo riportato nella UNI TS 11300-1 attraverso le seguenti equazioni:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} * Q_{gn} = \left(Q_{H,tr} + Q_{H,ve}\right) - \eta_{H,gn} * (Q_{int} + Q_{sol,w})$$

$$Q_{C,nd} = Q_{gn} - \eta_{C,ls} * Q_{C,ht} = \left(Q_{int} + Q_{sol,w}\right) - \eta_{C,ls} * (Q_{C,tr} + Q_{C,ve})$$

Q_{ht} sono gli scambi di energia termica totale (nel caso di riscaldamento o raffrescamento) dati dalla somma degli scambi di energia termica per trasmissione e ventilazione, mentre Q_{gn} sono gli apporti totali di energia termica dati dalla somma degli apporti dovuti a sorgenti interne e alla radiazione solare incidente sui componenti vetrati. $\eta_{H,gn}$ è il fattore di utilizzazione (adimensionale) degli apporti termici nel periodo invernare, mentre $\eta_{C,ls}$ è il fattore di utilizzazione delle dispersioni termiche nel periodo estivo. All'aumentare del fattore di utilizzazione, che può assumere come massimo valore 1, diminuirà il fabbisogno di energia utile poiché la quota parte di apporti/dispersioni che viene sottratta aumenterà. Il fattore di utilizzazione è calcolato in funzione della costante di tempo e di γ (adimensionale), valore che identifica il rapporto tra gli apporti di energia termica e gli scambi di energia termica totali ($\gamma = Q_{gn}/Q_{ht}$). In particolare, all'aumentare della costante di tempo il fattore di utilizzazione tenderà sempre di più ad 1, ottenendo quindi la situazione migliore, ovvero tutti gli apporti interni/dispersioni vengono sottratti assicurando il fabbisogno di energia utile più basso possibile. Essendo un metodo mensile si avrà un certo valore di fabbisogno di energia utile associato ad ogni mese e quindi anche un certo valore di η e γ. Per evidenziare l'incidenza della costante di tempo è possibile realizzare dei grafici che correlino i fattori di utilizzazione ai γ associati ad ogni mese, così da costruire delle curve che forniscano delle informazioni sul comportamento della zona termica che si desidera studiare.

Come evidenziato dalle analisi precedenti, i risultati associati al piano terra tra i due casi studio si mantengono costanti, a differenza del piano primo dove i risultati differiscono a causa della diversa tipologia di solaio di sottotetto. Per questo motivo i grafici $\eta - \gamma$ verranno realizzati in funzione della variazione di n per il piano terra e in funzione della variazione del solaio di sottotetto per il piano primo.

5.1.4.1 Milano

- Piano Terra

Per questa zona termica si è scelto di evidenziare il comportamento delle curve $\eta - \gamma$ al variare del valore di n, sia per la struttura massiva che per la struttura leggera. Il primo grafico riguarderà il periodo invernale, mentre il secondo il periodo estivo. In entrambi i casi le curve posizionate più in alto identificano la situazione con costante di tempo più elevata poiché, a parità di γ, identificano fattori di utilizzazione maggiori e quindi più tendenti ad 1. È possibile notare come la struttura massiva con n pari a 0,10 abbia la costante di tempo maggiore, questo perché è caratterizzata da una capacità termica interna superiore rispetto

alla struttura leggera e coefficiente di scambio termico per ventilazione minore rispetto alla struttura massiva con n pari a 0,50. La seconda curva con costante di tempo più elevata è associata alla struttura leggera con n pari a 0,10, questo conferma ciò che già è stato osservato nella prima analisi, ovvero che pesa di più la variazione di n rispetto alla variazione di struttura poiché la struttura leggera con n 0,10 ha comunque una costante di tempo superiore alla struttura massiva con n 0,50. Successivamente si individuano le curve associate alla struttura massiva e leggera con n pari a 0,50. Questo grafico permette di stabilire che la struttura massiva ha sempre costante di tempo più elevata rispetto alla struttura leggera e che la variazione di n ha un'incidenza maggiore rispetto alla variazione di struttura, poiché la struttura leggera con n pari a 0,10 ha costante di tempo superiore alla struttura massiva con n pari a 0,50. Le stesse osservazioni sono estese al periodo estivo, cambierà solo la forma del grafico poiché sull'asse delle ascisse è riportato $1/\gamma_C$ e non γ_H.

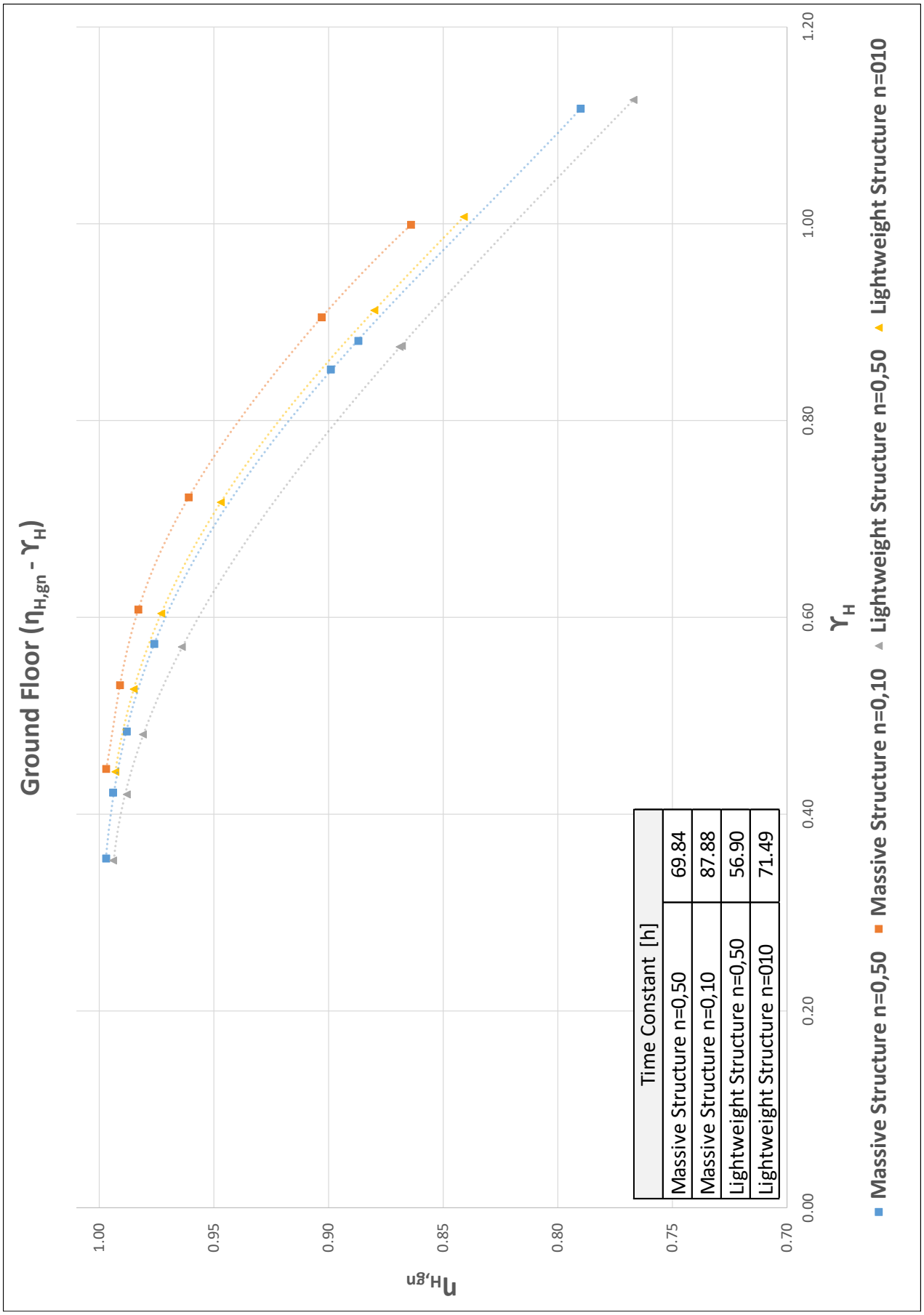

Grafico 123: Piano Terra, Rapporto tra Costante di Tempo, Fattore di Utilizzazione e γ_H (Periodo Invernale) al Variare di n e della Tipologia di Struttura (Milano)

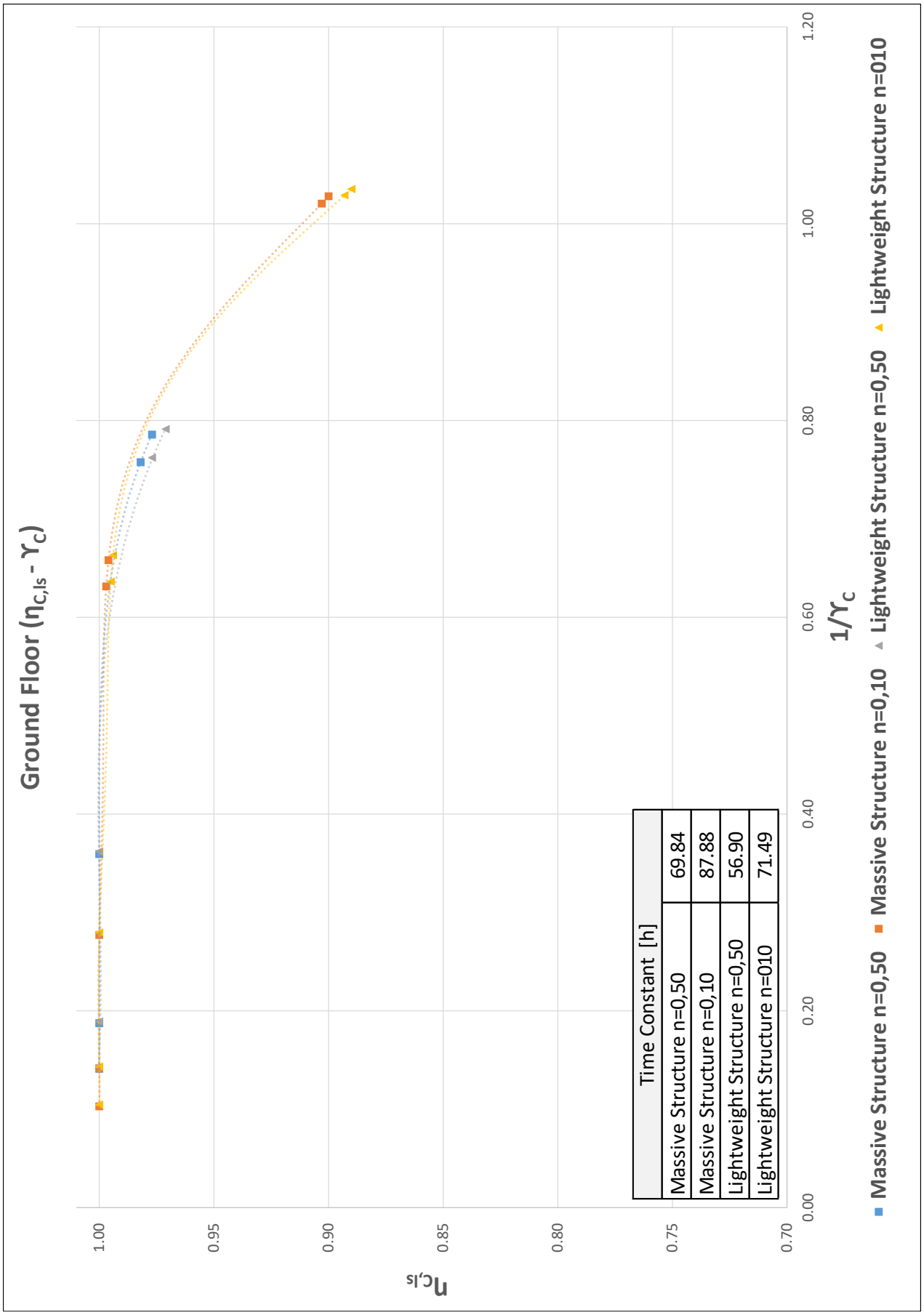

Grafico 124: Piano Terra, Rapporto tra Costante di Tempo, Fattore di Utilizzazione e Υ_c (Periodo Estivo) al Variare di n e della Tipologia di Struttura (Milano)

- Piano Primo

Per questa zona termica si è scelto di evidenziare il comportamento delle curve $\eta - \gamma$ al variare della tipologia di solaio di sottotetto, sia per la struttura massiva che per la struttura leggera, fissando il valore di n pari a 0,50. Come per il piano terra il primo grafico riguarderà il periodo invernale, mentre il secondo il periodo estivo. In entrambi i casi le curve posizionate più in alto identificano la situazione con costante di tempo più elevata poiché, a parità di γ, identificano fattori di utilizzazione maggiori e quindi più tendenti ad 1. È possibile notare come la struttura massiva del caso studio 2 abbia la costante di tempo maggiore, questo è dovuto al fatto che rispetto al caso studio 3 si ha un solaio di sottotetto con trasmittanza molto minore. Ciò implica un coefficiente di scambio termico per trasmissione minore nel caso studio 2 rispetto al caso studio 3. A parità di capacità termica interna e di coefficiente di scambio termico per ventilazione, avere un coefficiente di scambio termico per trasmissione minore implica una costante di tempo più elevata, trovandosi esso al denominatore dell'equazione utilizzata per determinare la costante di tempo. Questo aspetto è stato evidenziato nella seconda analisi e trova conferma in questo grafico dove, a parità di γ, la struttura massiva del caso studio 2 assicura il maggior fattore di utilizzazione. Lo stesso comportamento si ripete anche nel caso di strutture leggere. È possibile notare anche per questa zona termica come la struttura massiva abbia sempre costante di tempo superiore rispetto alla struttura leggera. Le stesse osservazioni sono estese al periodo estivo, cambierà solo la forma del grafico poiché sull'asse delle ascisse è riportato $1/\gamma_C$ e non γ_H.

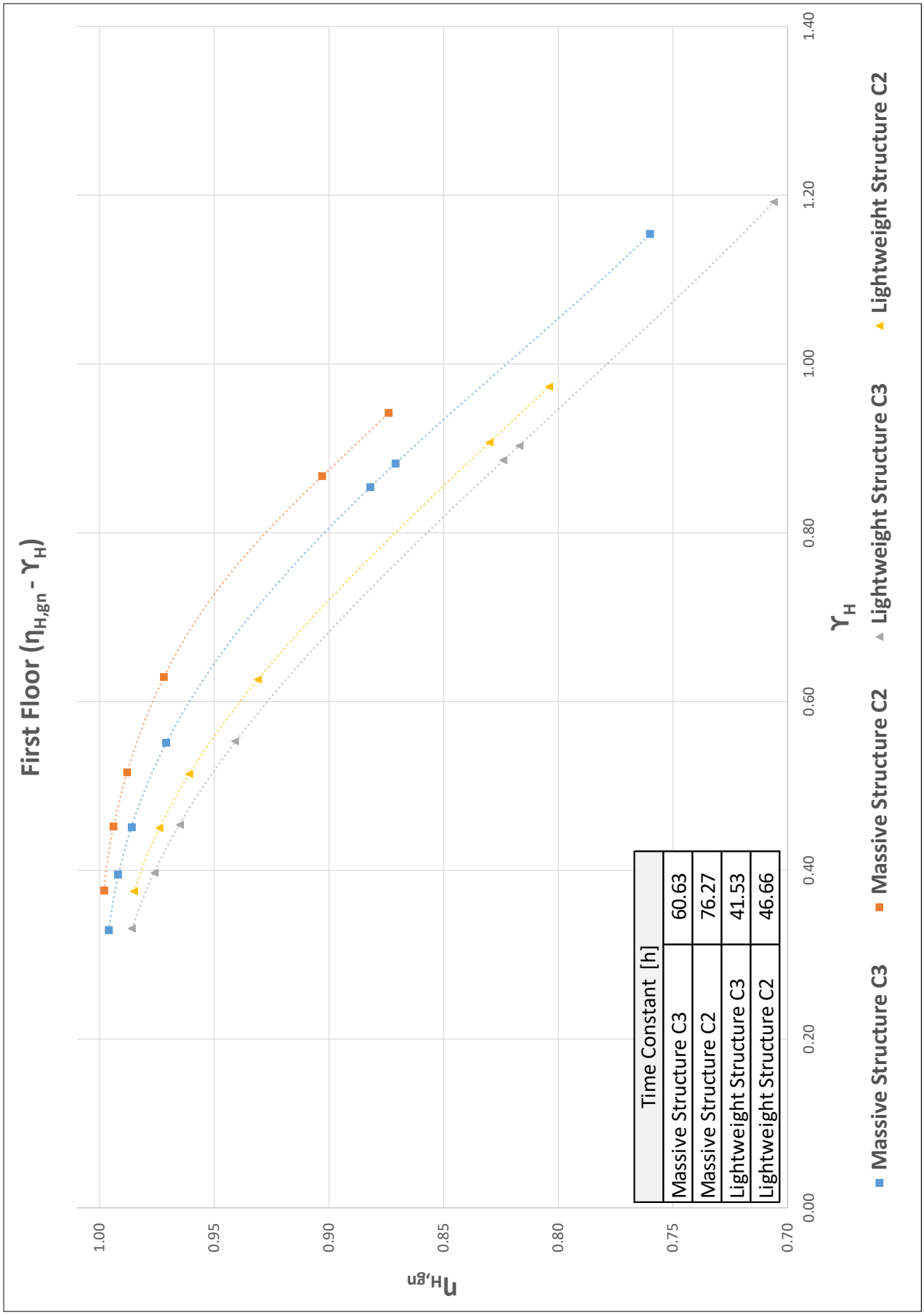

Grafico 125: Piano Primo, Rapporto tra Costante di Tempo, Fattore di Utilizzazione e γ_H (Periodo Invernale) al Variare della Tipologia di Struttura e del Caso Studio (Milano)

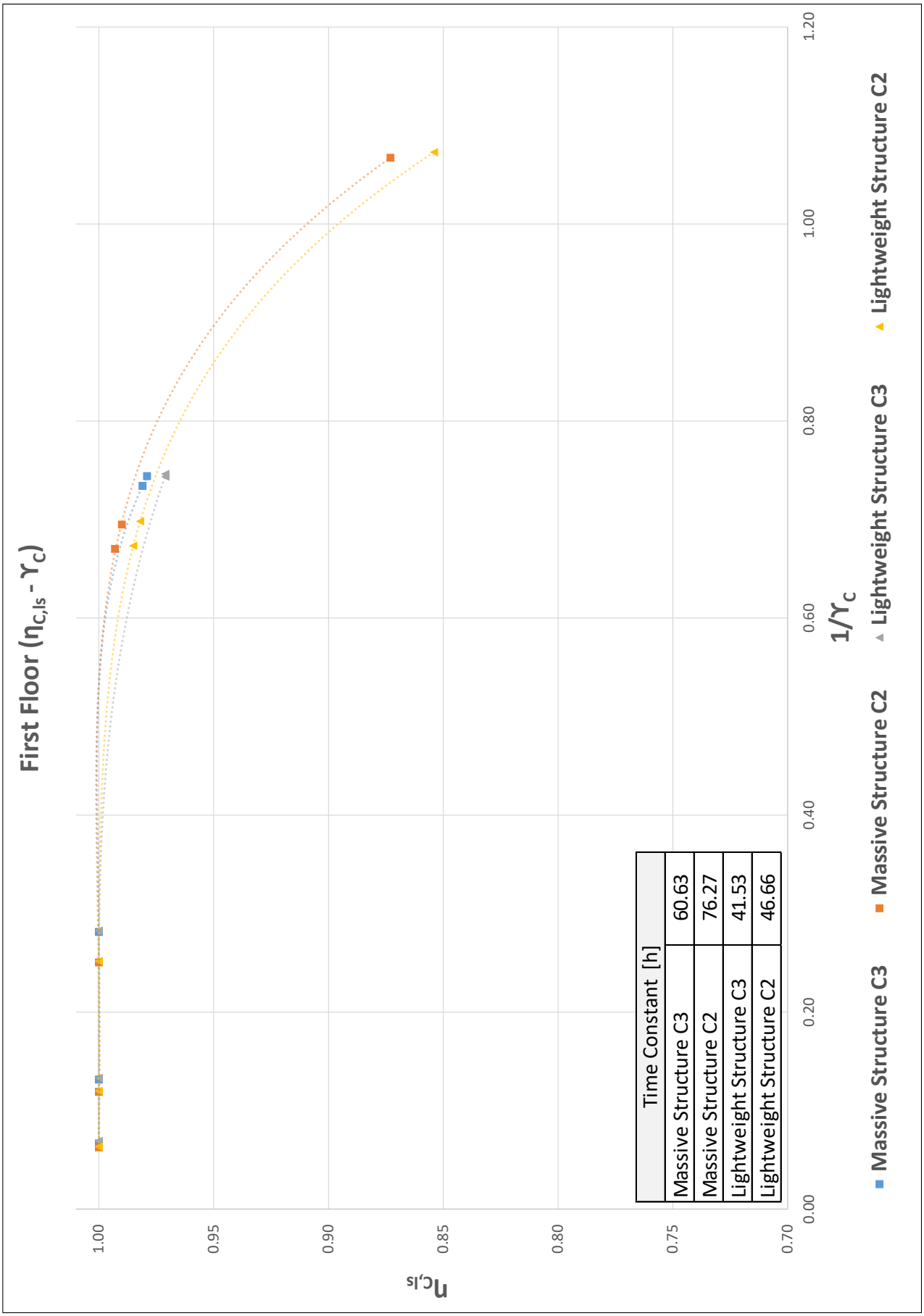

Grafico 126: Piano Primo, Rapporto tra Costante di Tempo, Fattore di Utilizzazione e Υ_C (Periodo Estivo) al Variare della Tipologia di Struttura e del Caso Studio (Milano)

5.1.4.2 Roma

- Piano Terra (grafico 127 e 128)

Analizzando i grafici inerenti sia al periodo estivo che a quello invernale si possono osservare le medesime conclusioni già commentate per Milano, ovvero che la struttura massiva ha sempre una costante di tempo più elevata rispetto alla struttura leggera e che la variazione di n ha un'incidenza maggiore rispetto alla variazione di struttura, poiché la struttura leggera con n pari a 0,10 ha costante di tempo superiore rispetto alla struttura massiva con n pari a 0,50.

- Piano Primo (grafico 129 e 130)

Come per il piano terra, le conclusioni sono le medesime commentate per il piano primo di Milano, ovvero che la struttura massiva ha sempre una costante di tempo più elevata rispetto alla struttura leggera e che le costanti di tempo associate alle strutture del caso studio 2 sono maggiori rispetto alle costanti di tempo associata alle strutture del caso studio 3.

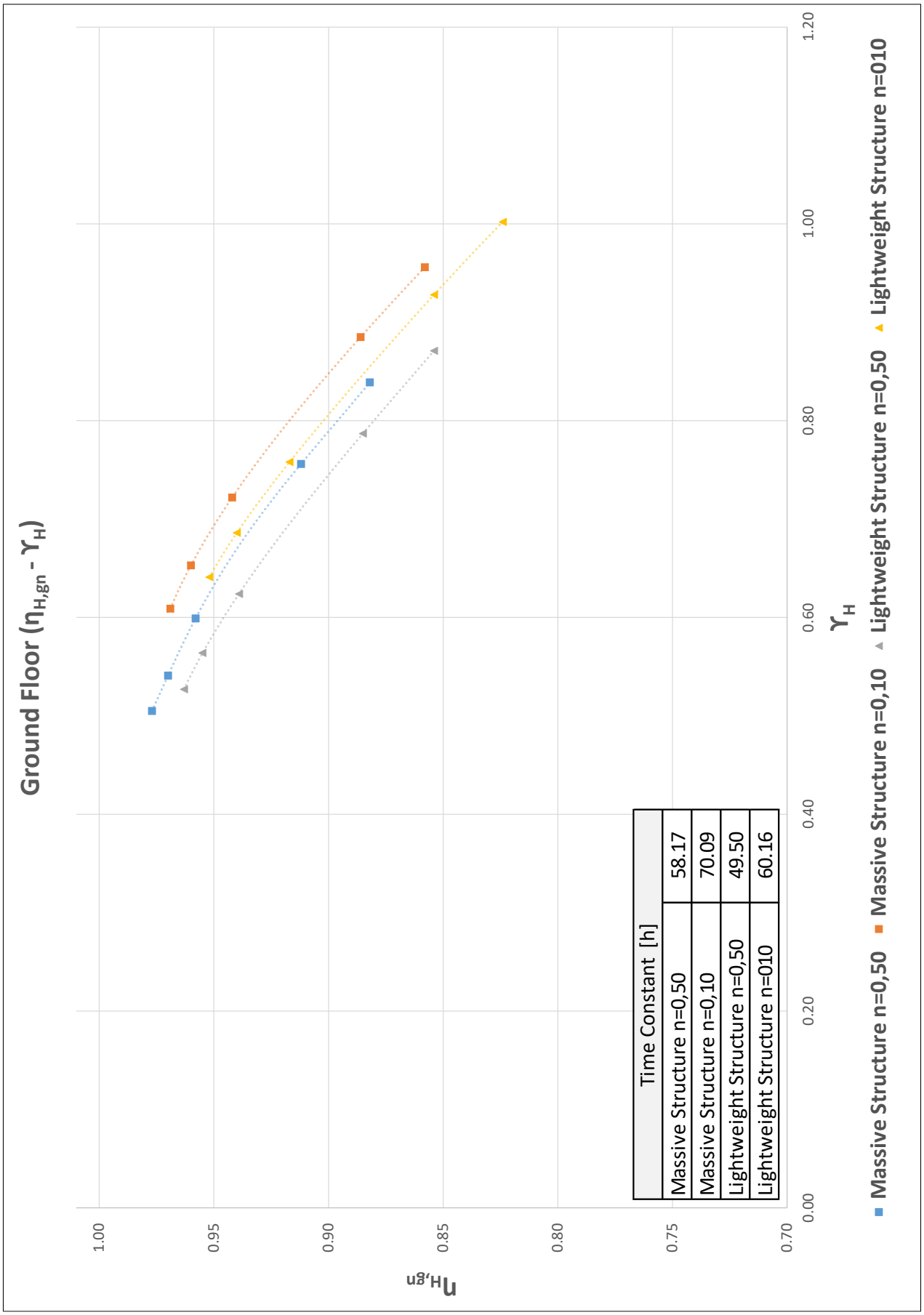

Grafico 127: Piano Terra, Rapporto tra Costante di Tempo, Fattore di Utilizzazione e γ_H (Periodo Invernale) al Variare di n e della Tipologia di Struttura (Roma)

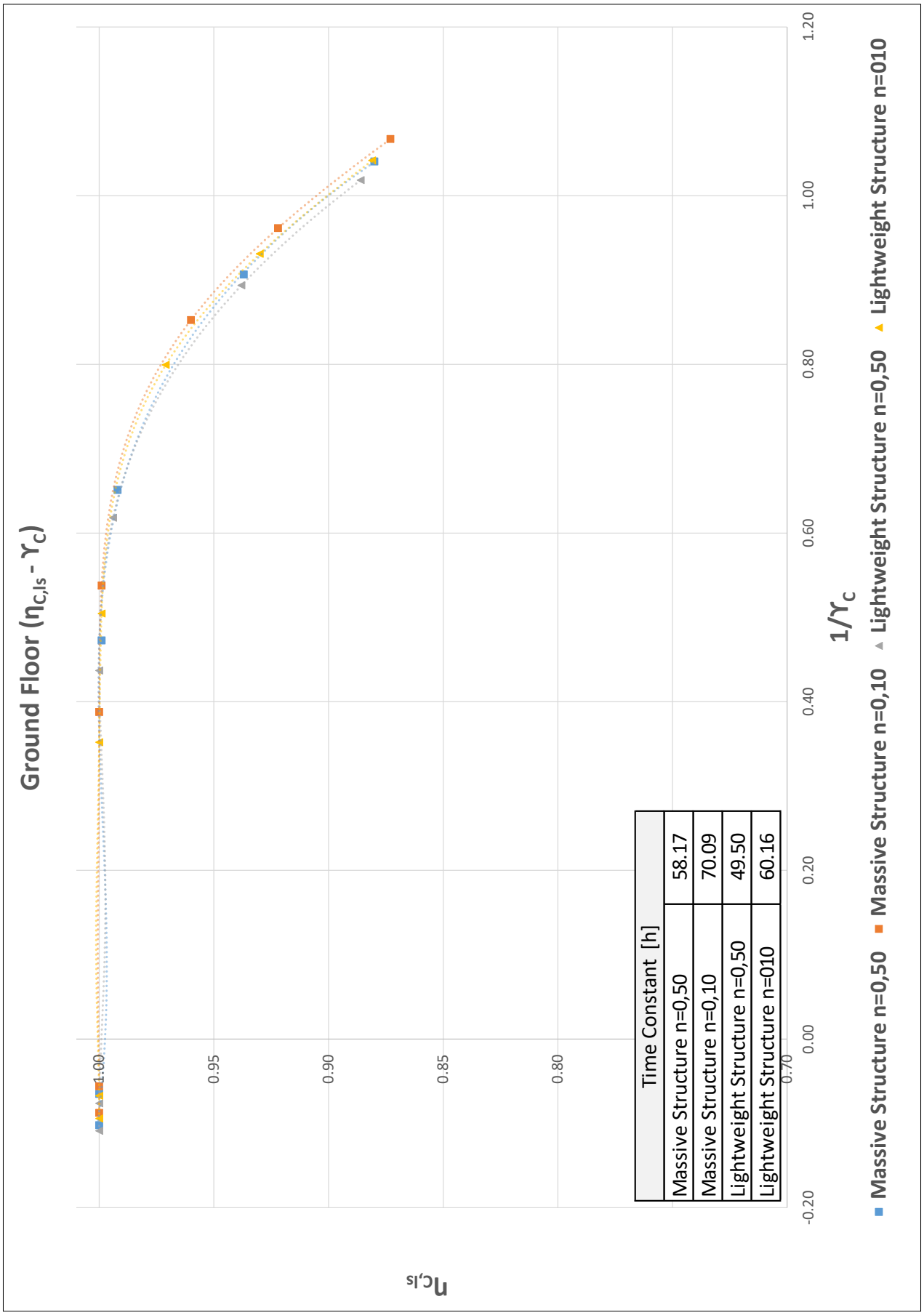

Grafico 128: Piano Terra, Rapporto tra Costante di Tempo, Fattore di Utilizzazione e Υ_c (Periodo Estivo) al Variare di n e della Tipologia di Struttura (Roma)

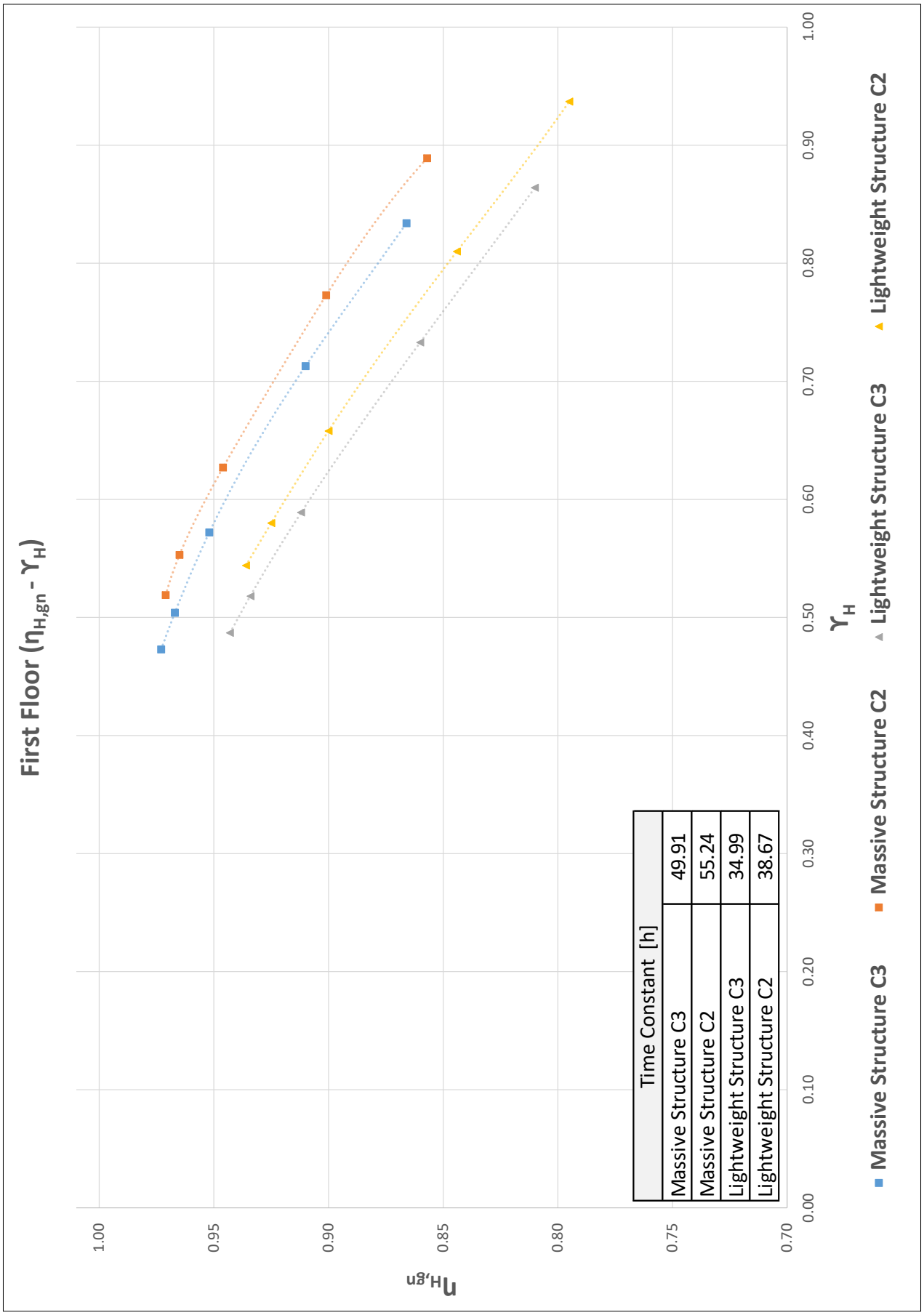

Grafico 129: Piano Primo, Rapporto tra Costante di Tempo, Fattore di Utilizzazione e γ_H (Periodo Invernale) al Variare della Tipologia di Struttura e del Caso Studio (Roma)

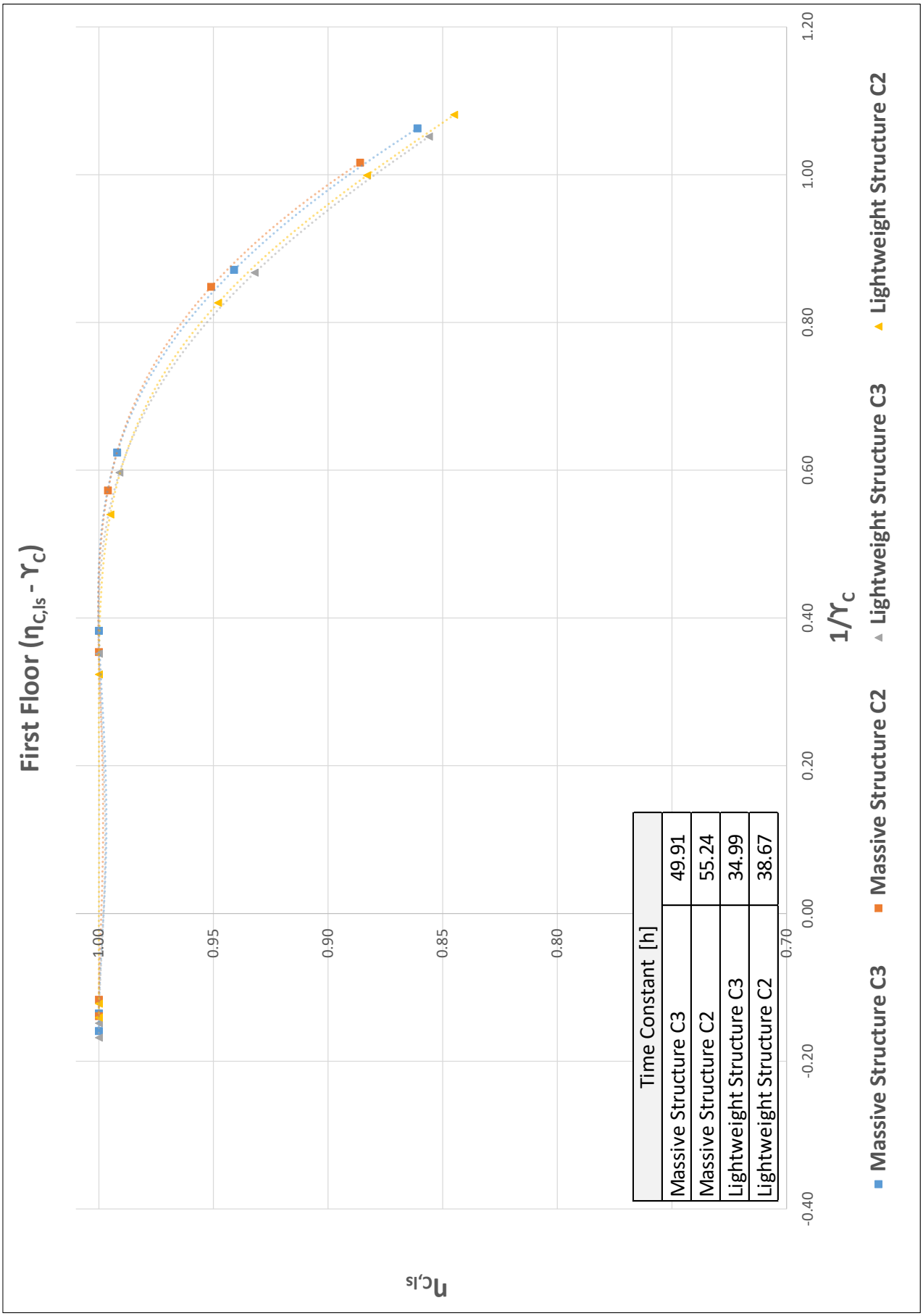

Grafico 130: Piano Primo, Rapporto tra Costante di Tempo, Fattore di Utilizzazione e Υ_C (Periodo Estivo) al Variare della Tipologia di Struttura e del Caso Studio (Roma)

5.1.4.3 Palermo

- Piano Terra (grafico 131 e 132)

Analizzando i grafici inerenti sia al periodo estivo che a quello invernale è possibile affermare che la struttura massiva ha sempre una costante di tempo più elevata rispetto alla struttura leggera e che la variazione della tipologia di struttura ha un'incidenza maggiore rispetto alla variazione di n, poiché la struttura leggera con n pari a 0,10 ha costante di tempo minore rispetto alla struttura massiva con n pari a 0,50.

- Piano Primo (grafico 133 e 134)

In questo caso le conclusioni sono le medesime commentate per il piano primo di Milano e Roma, ovvero che la struttura massiva ha sempre una costante di tempo più elevata rispetto alla struttura leggera e che le costanti di tempo associate alle strutture del caso studio 2 sono maggiori rispetto alle costanti di tempo associata alle strutture del caso studio 3.

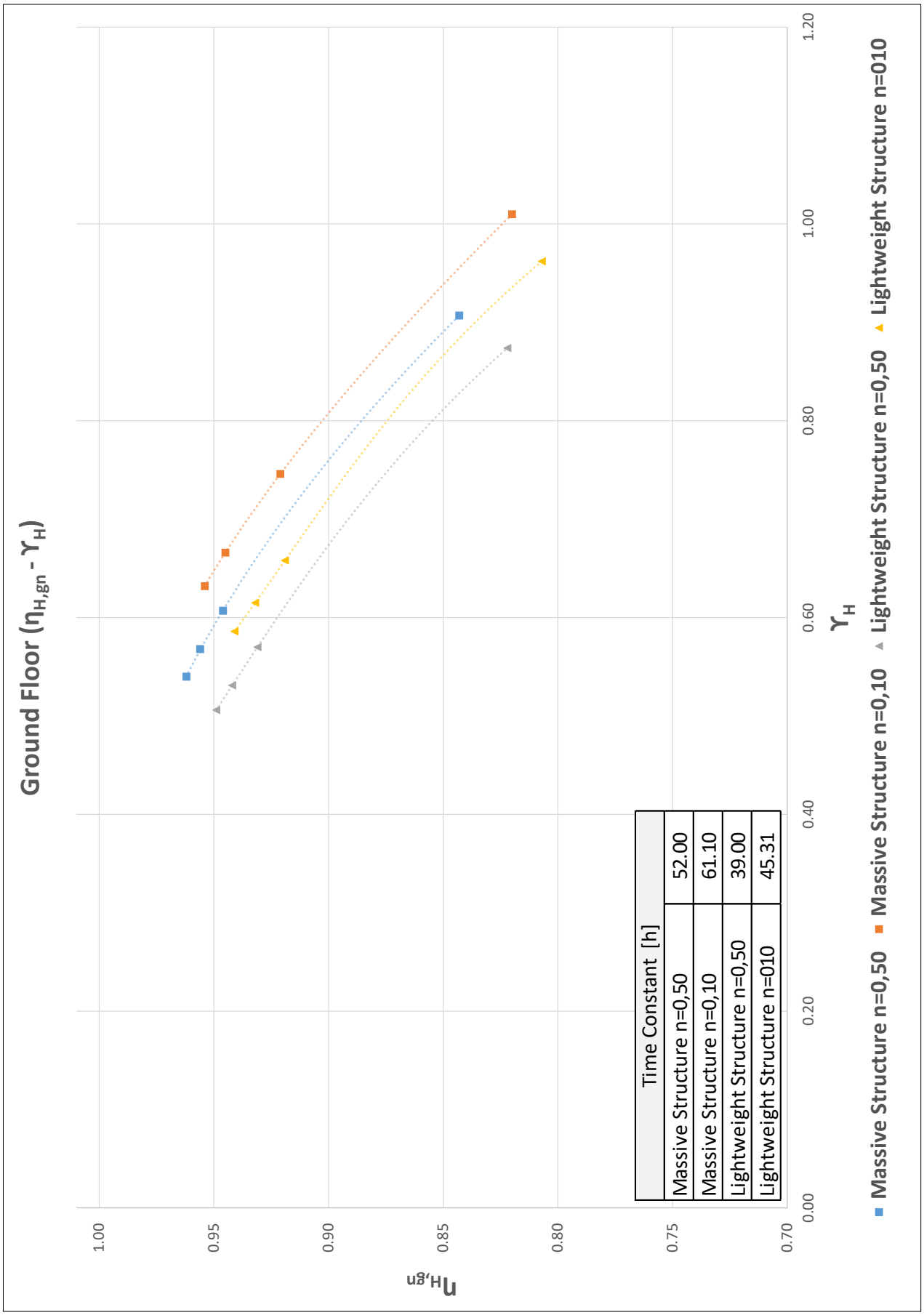

Grafico 131: Piano Terra, Rapporto tra Costante di Tempo, Fattore di Utilizzazione e γ_H (Periodo Invernale) al Variare di n e della Tipologia di Struttura (Palermo)

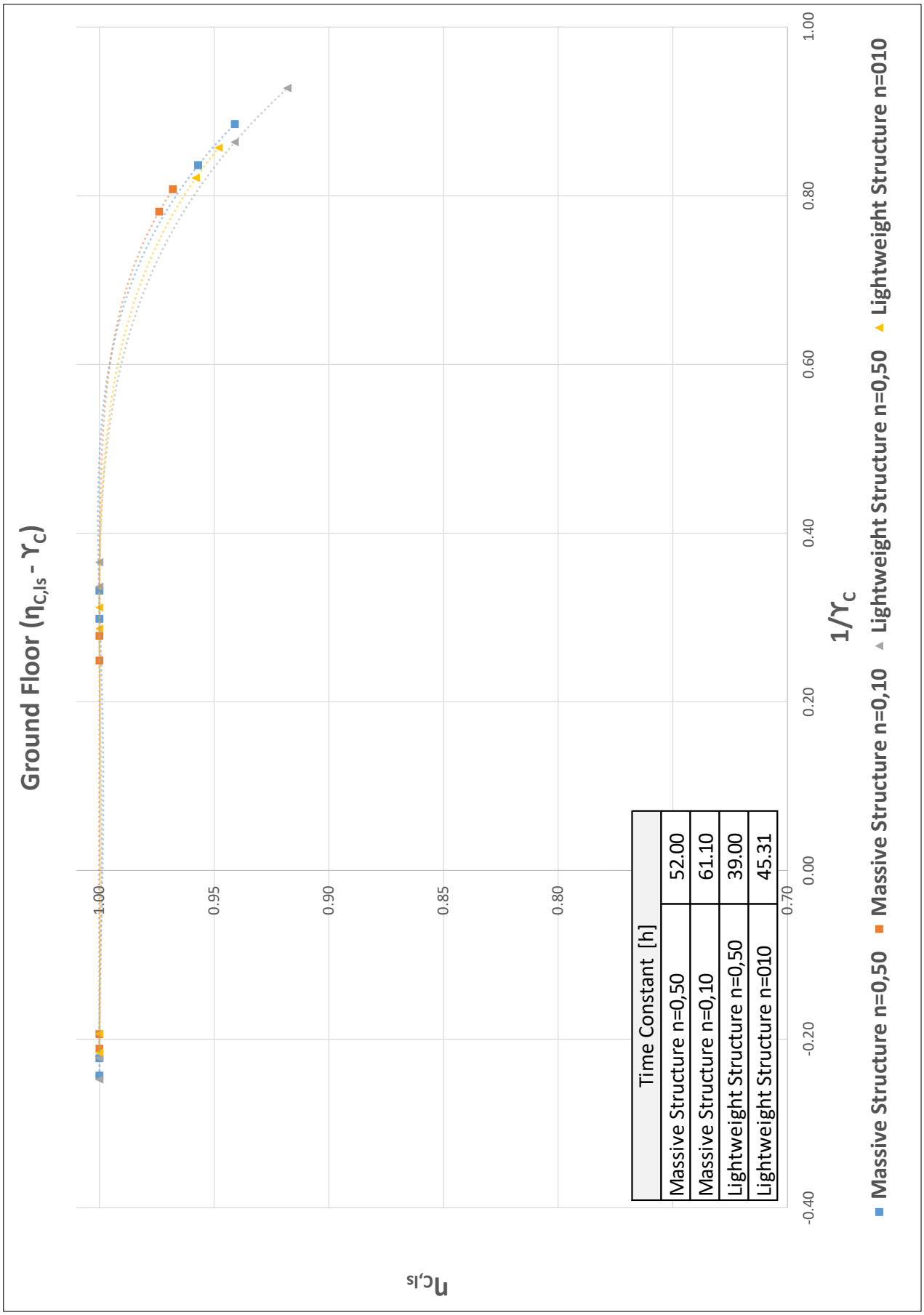

Grafico 132: Piano Terra, Rapporto tra Costante di Tempo, Fattore di Utilizzazione e Υ_c (Periodo Estivo) al Variare di n e della Tipologia di Struttura (Palermo)

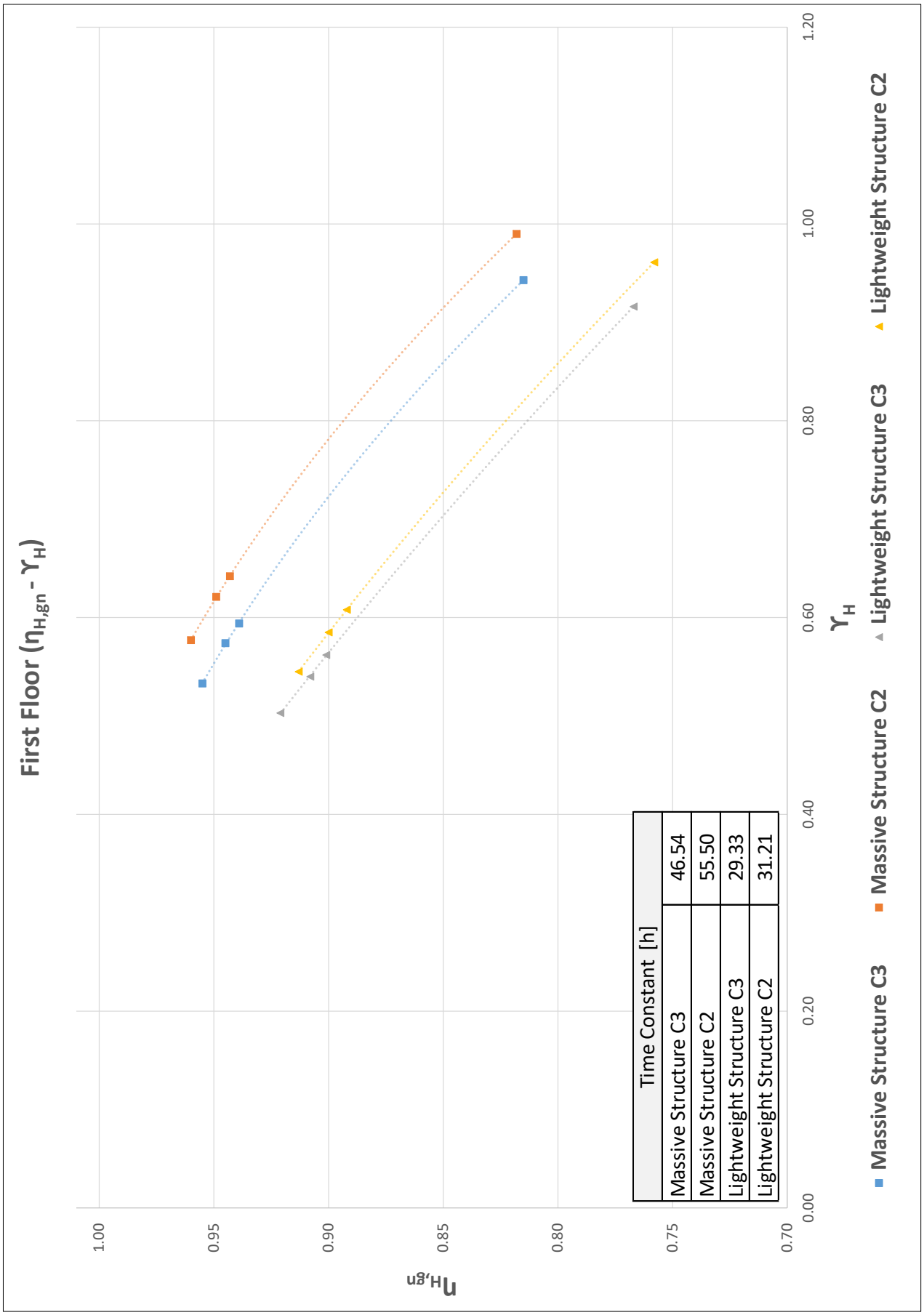

Grafico 133: Piano Primo, Rapporto tra Costante di Tempo, Fattore di Utilizzazione e γ_H (Periodo Invernale) al Variare della Tipologia di Struttura e del Caso Studio (Palermo)

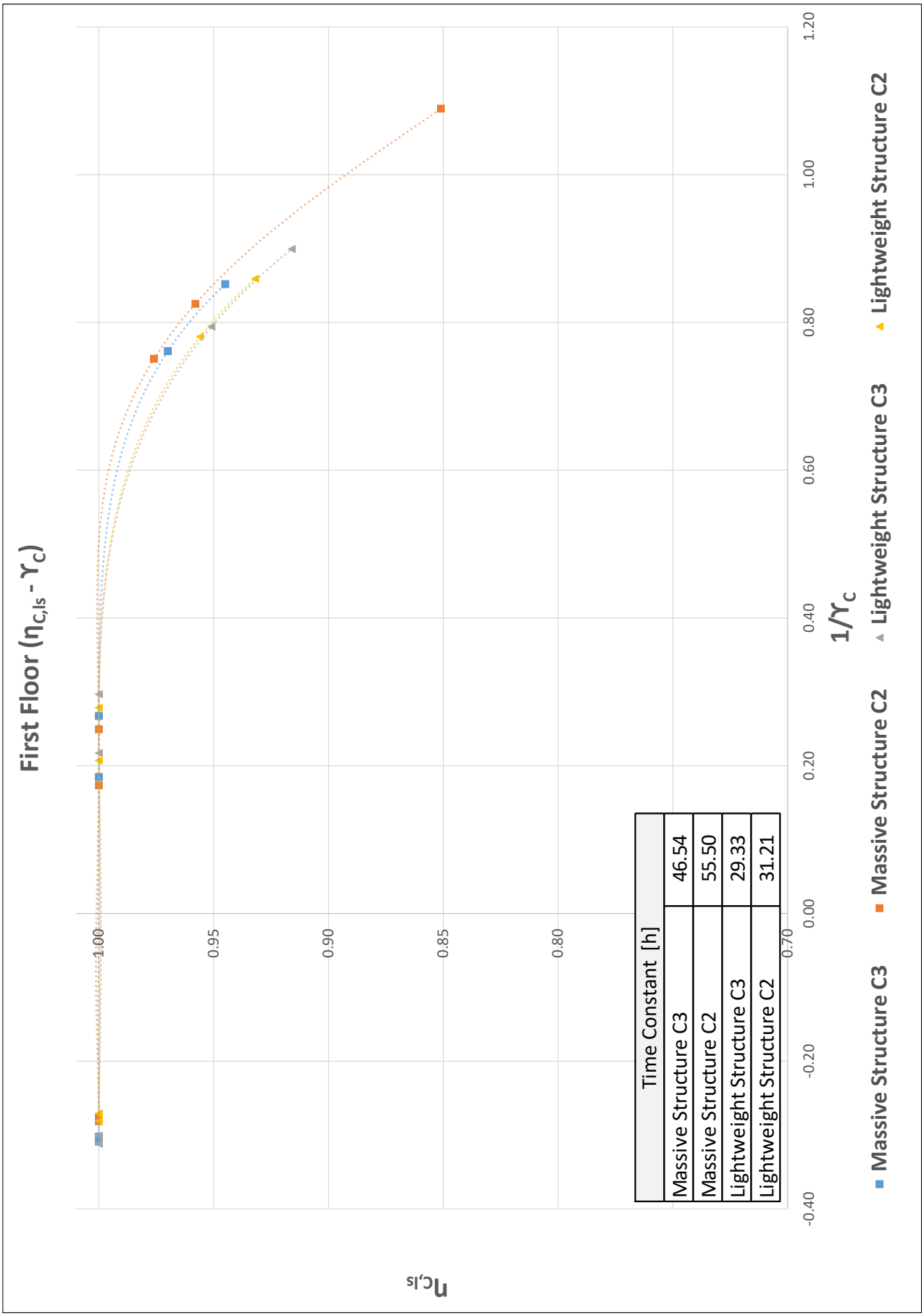

Grafico 134: Piano Primo, Rapporto tra Costante di Tempo, Fattore di Utilizzazione e Υ_C (Periodo Estivo) al Variare della Tipologia di Struttura e del Caso Studio (Palermo)

Conclusioni Analizzando i Risultati delle Diverse Località

Analizzando i risultati delle analisi al variare dalla località si è notato che, ponendo costante la capacità termica interna, all'aumentare del coefficiente di scambio termico per trasmissione l'incidenza sulla costante di tempo del coefficiente di scambio termico per ventilazione diminuisce. Riprendendo l'equazione della costante di tempo si ha:

$$\tau = \frac{C_m}{\left(H_{tr,adj} + H_{ve,adj}\right) * 3600}$$

Se si aumenta significativamente il valore del coefficiente $H_{tr,adj}$, il valore del coefficiente $H_{ve,adj}$ avrà un minor peso sul denominatore di tale equazione e di conseguenza sulla costante di tempo. Coefficienti di scambio termico per trasmissione ridotti sono associati ad edifici molto isolati, mentre coefficienti di scambio termico per trasmissione elevati sono associati ad edifici poco isolati. Ciò significa che per edifici molto isolati ($H_{tr,adj}$ basso) l'incidenza della ventilazione sulla costante di tempo sarà molto superiore rispetto all'incidenza della ventilazione che si avrebbe in caso di edifici poco isolati ($H_{tr,adj}$ alto). Questa conclusione evidenzia l'importanza della ventilazione, e quindi del valore di n, in caso di edifici molto isolati. Quindi la costante di tempo associata ad un edificio molto isolato sarà maggiormente influenzata dalla ventilazione, poiché all'aumentare di n aumenta il coefficiente di scambio termico per ventilazione e di conseguenza diminuirà la costante di tempo.

5.2 Valutazione Del Fabbisogno di Energia Utile in Funzione dei Ricambi di Aria

In questo paragrafo verrà affrontata l'analisi riguardante il confronto dei fabbisogni di energia utile, determinati mediante il metodo di calcolo semi stazionario riportato nella norma UNI TS 11300-1, in funzione dal diverso valore di n, cioè del tasso di ricambio d'aria espresso in [1/h]. L'analisi coinvolgerà il caso studio 2 e il caso studio 3, considerando sia la struttura massiva che la struttura leggera. Il tasso di ricambio d'aria verrà fissato pari a 0,50 e a 0,10.

5.2.1 Milano

Indipendentemente dal caso studio considerato o dalla tipologia di struttura, analizzando i fabbisogni di energia utile si nota come un aumento del valore di n comporta un maggiore fabbisogno di energia invernale e un minor fabbisogno di energia estivo. Osservando le percentuali di incremento/decremento dei fabbisogni di energia è possibile notare come il vantaggio ottenuto nel periodo invernale, dovuto ad un tasso di ricambio d'aria minore, ha una maggiore influenza rispetto allo svantaggio che si ottiene nel periodo estivo, poiché il fabbisogno totale annuo associato ad n pari a 0,10 risulta minore rispetto al caso con n pari a 0,50. Osservando i grafici riguardanti il caso studio 2 e il caso studio 3 (sia per la struttura leggera che per la struttura massiva) si nota come la variazione di n abbia un'incidenza leggermente superiore nel caso studio 2, poiché le percentuali di variazione dei fabbisogni al variare di n risultano maggiori rispetto a quelle associate al caso studio 3. Tra struttura massiva e struttura leggera invece la tipologia che risente maggiormente della variazione di n è la struttura massiva, anche se nuovamente la differenza tra le percentuali non risulta essere significativa.

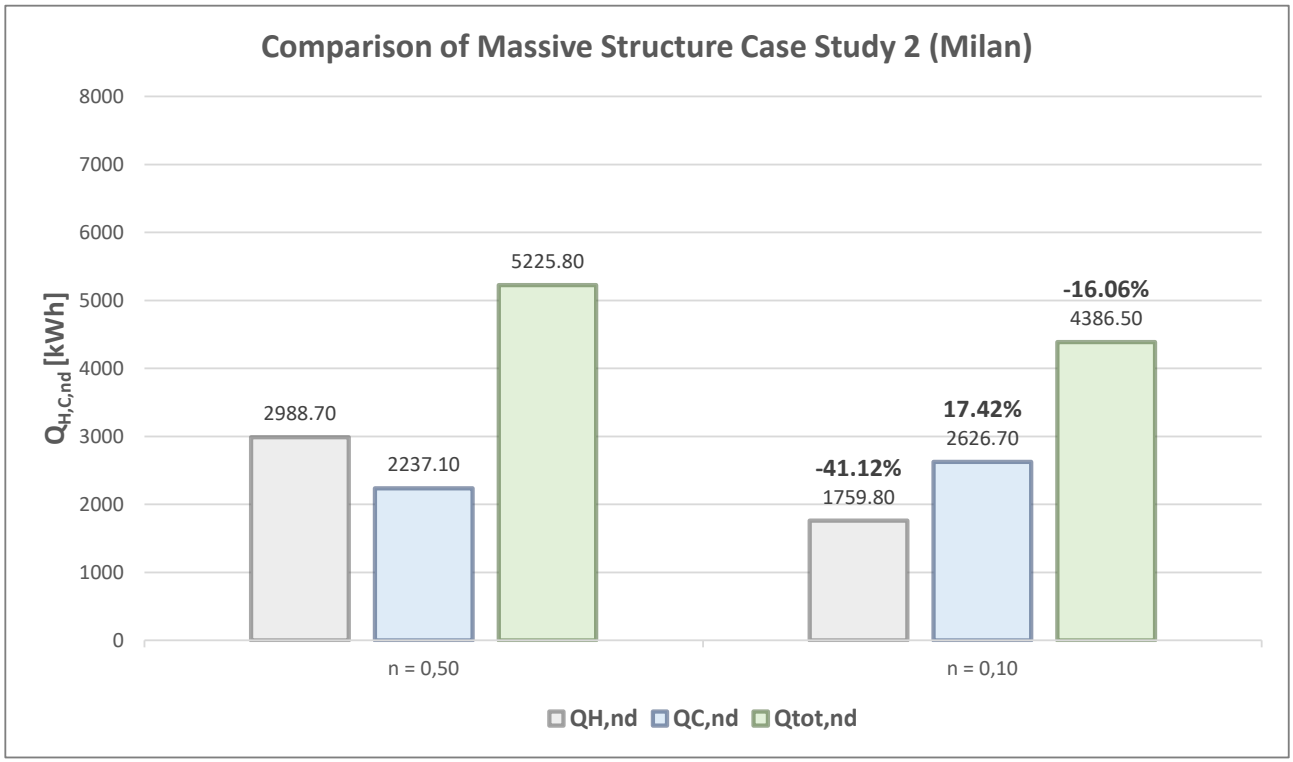

Grafico 135: Struttura Massiva, Confronto Fabbisogni di Energia Utile al Variare del Valore di n [1/h] (Caso Studio 2, Milano)

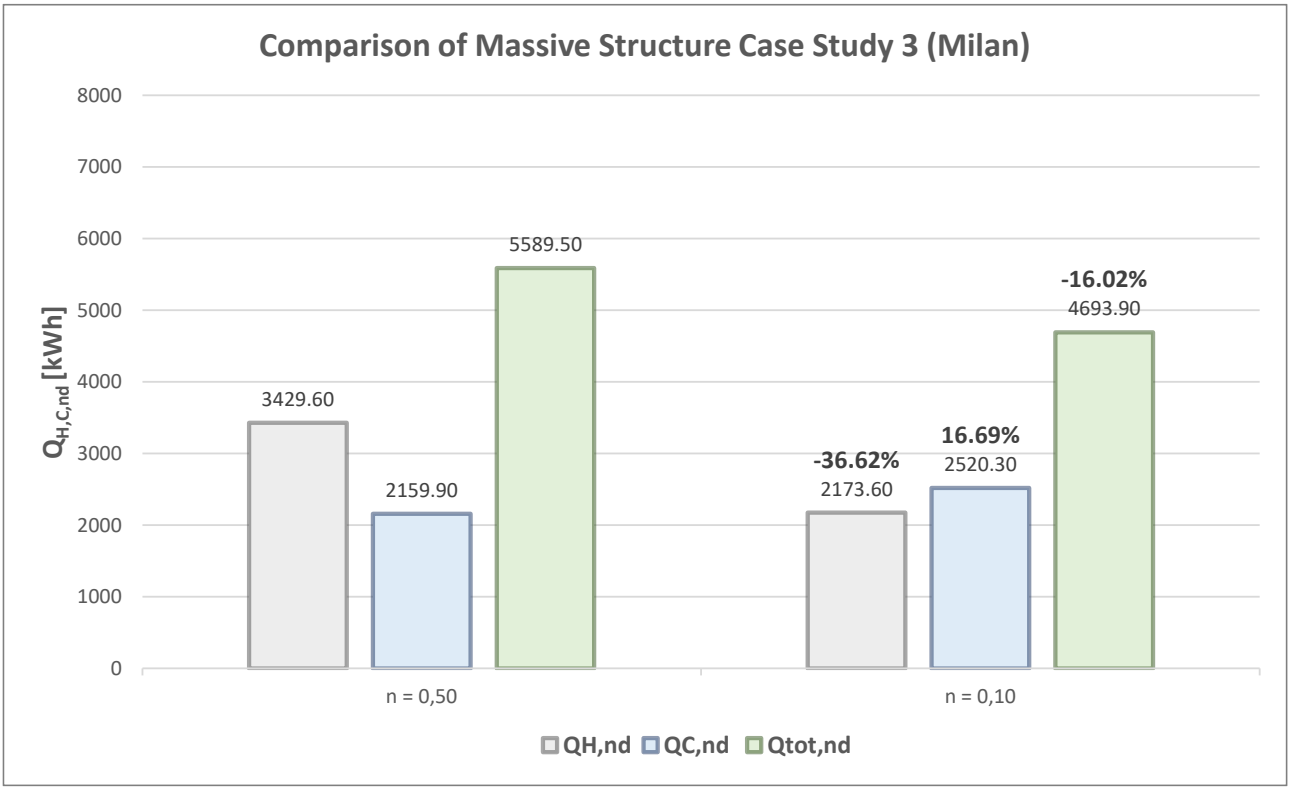

Grafico 136: Struttura Massiva, Confronto Fabbisogni di Energia Utile al Variare del Valore di n [1/h] (Caso Studio 3, Milano)

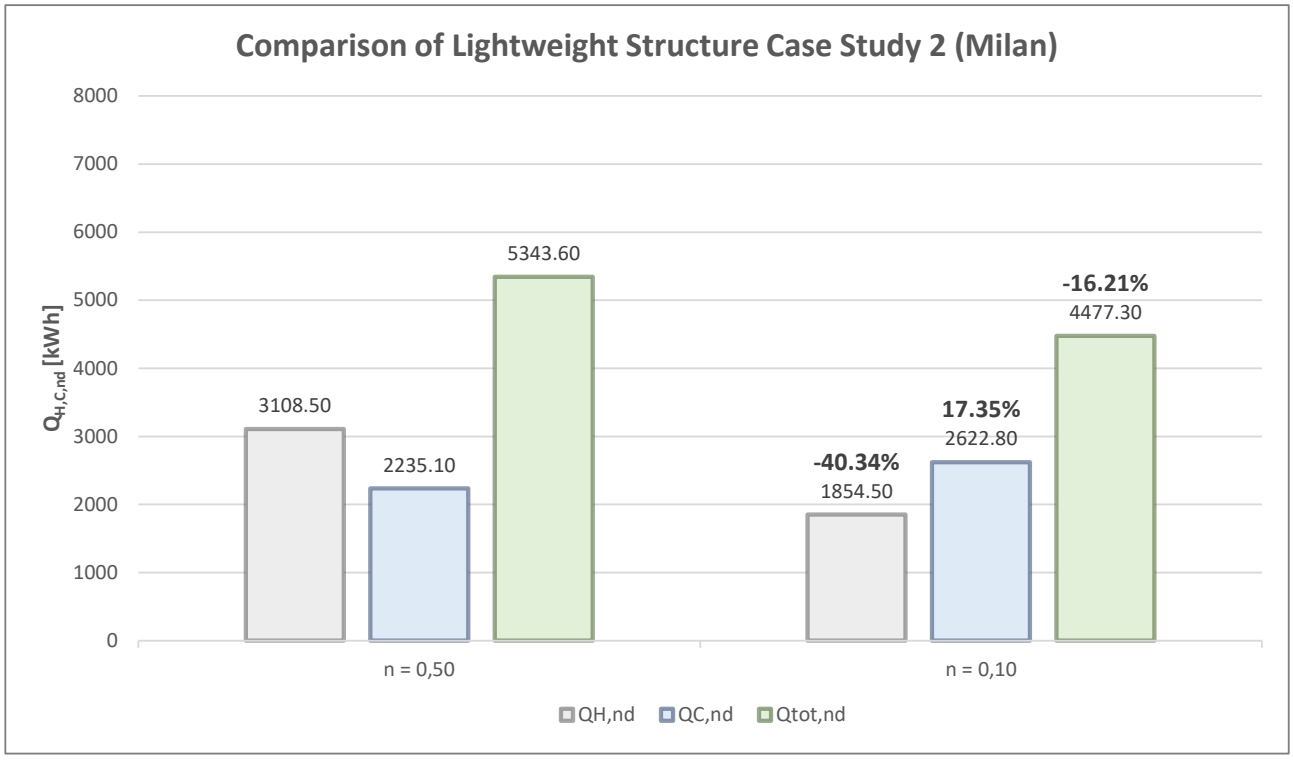

Grafico 137: Struttura Leggera, Confronto Fabbisogni di Energia Utile al Variare del Valore di n [1/h] (Caso Studio 2, Milano)

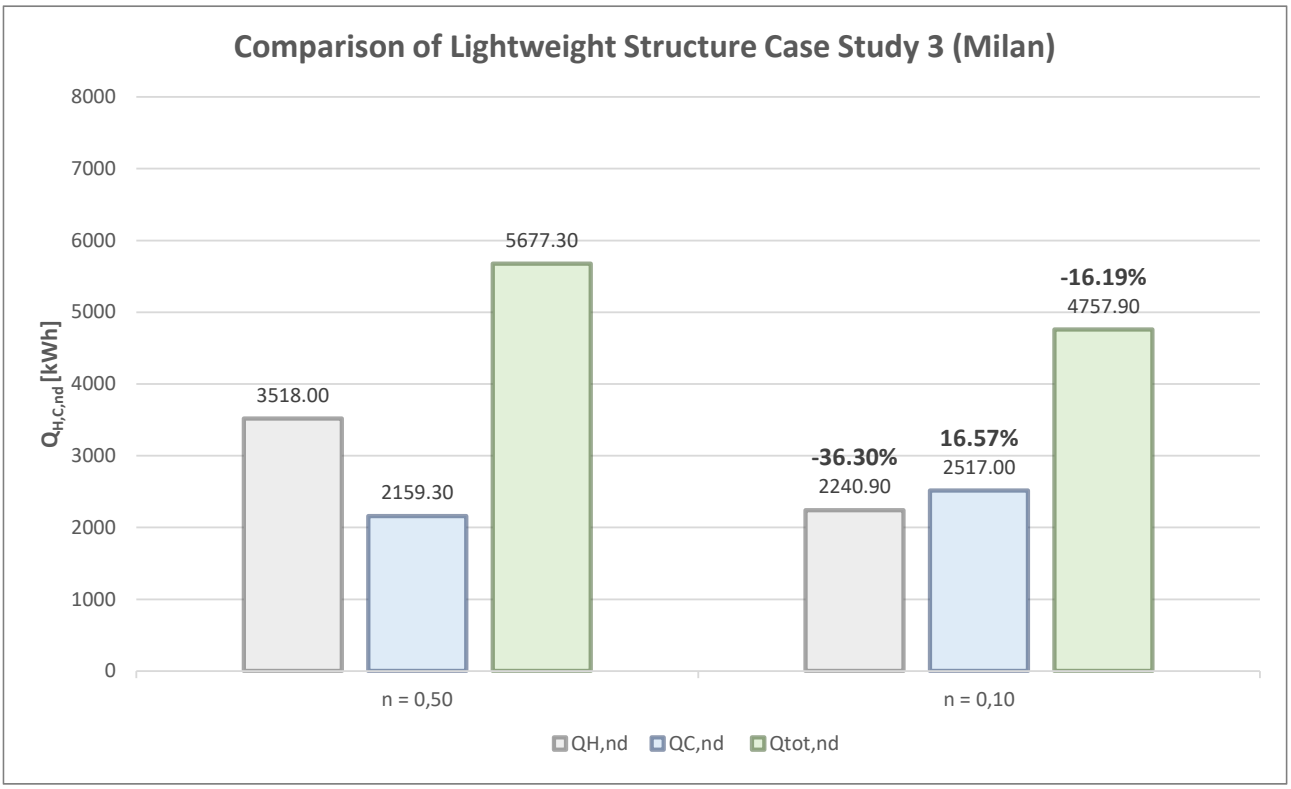

Grafico 138: Struttura Leggera, Confronto Fabbisogni di Energia Utile al Variare del Valore di n [1/h] (Caso Studio 3, Milano)

Fissando il valore di n e il caso studio, è possibile notare dai grafici precedenti come la struttura leggera abbia un fabbisogno invernale maggiore rispetto alla struttura massiva, mentre nel periodo estivo non risulta una particolare differenza tra i fabbisogni associati alle due tipologie di strutture. Di conseguenza il fabbisogno di energia totale maggiore risulta associato alla struttura leggera. Le stesse osservazioni, riguardanti la località di Milano, sono state effettuate nel paragrafo 4.5.1, dove il calcolo dei fabbisogni di energia utile è stato effettuato mediante il metodo dinamico (UNI EN ISO 52016) con n pari a 0,50. L'andamento dei fabbisogni di energia sarà lo stesso in entrambi i metodi, l'unica differenza è riscontrabile nell'entità dei fabbisogni che, essendo determinati tramite metodi di calcolo diversi, non coincideranno.

Fissando il valore di n e la tipologia di struttura, si nota come il fabbisogno invernale maggiore sia associato al caso studio 3 (solaio di sottotetto non isolato) mentre il fabbisogno estivo maggiore è associato al caso studio 2 (solaio di sottotetto isolato). Riguardo il fabbisogno di energia totale, esso risulta maggiore nel caso studio 3 rispetto al caso studio 2, ciò significa che nell'arco dell'anno l'edificio che risulta avere il minor fabbisogno di energia è l'edificio dotato di sottotetto isolato. Anche in questo caso le stesse osservazioni sono state effettuate utilizzando il metodo di calcolo dinamico (paragrafo 4.4.1).

5.2.2 Roma

Come per Milano, un aumento del valore di n comporta un maggiore fabbisogno di energia invernale e un minor fabbisogno di energia estivo, indipendentemente dal caso studio considerato o dalla tipologia di struttura. Rispetto a Milano la riduzione del fabbisogno di energia totale, ottenuta con la diminuzione di n, è leggermente minore, ciò accade perché il fabbisogno di energia estivo è superiore rispetto al fabbisogno di energia invernale. Questo significa che, anche se la diminuzione di n comporta un maggior vantaggio invernale rispetto allo svantaggio che si ottiene nel periodo estivo, andranno sempre considerate le entità dei fabbisogni, ovvero se il fabbisogno estivo risulta notevolmente maggiore rispetto a quello invernale si ottiene un'inversione dei risultati (aumento del fabbisogno totale associato ad n ridotto rispetto al fabbisogno totale

associato ad un n elevato). Osservando i grafici riguardanti il caso studio 2 e il caso studio 3 (sia per la struttura leggera che per la struttura massiva) si nota come la variazione di n abbia un'incidenza leggermente superiore nel caso studio 2, anche se sul fabbisogno totali le percentuali di variazione risultato circa costanti tra i due casi studio.

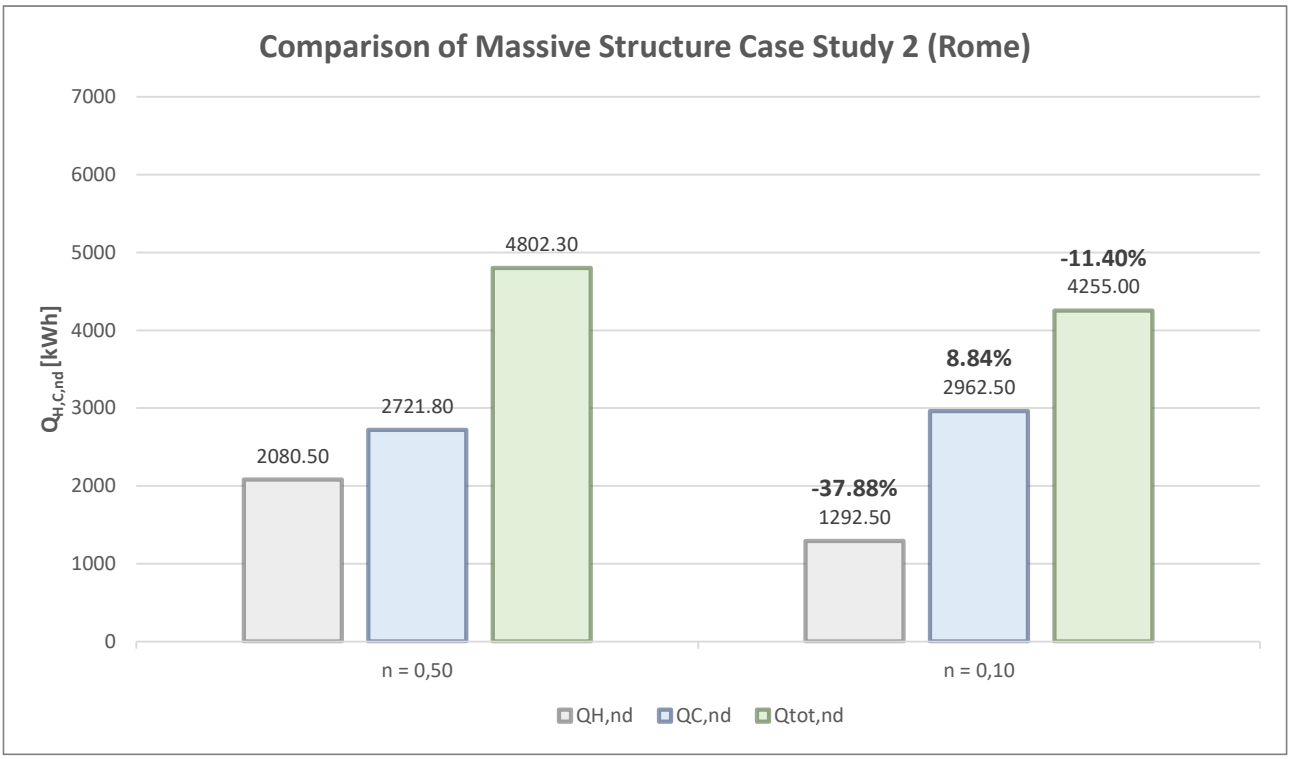

Grafico 139: Struttura Massiva, Confronto Fabbisogni di Energia Utile al Variare del Valore di n [1/h] (Caso Studio 2, Roma)

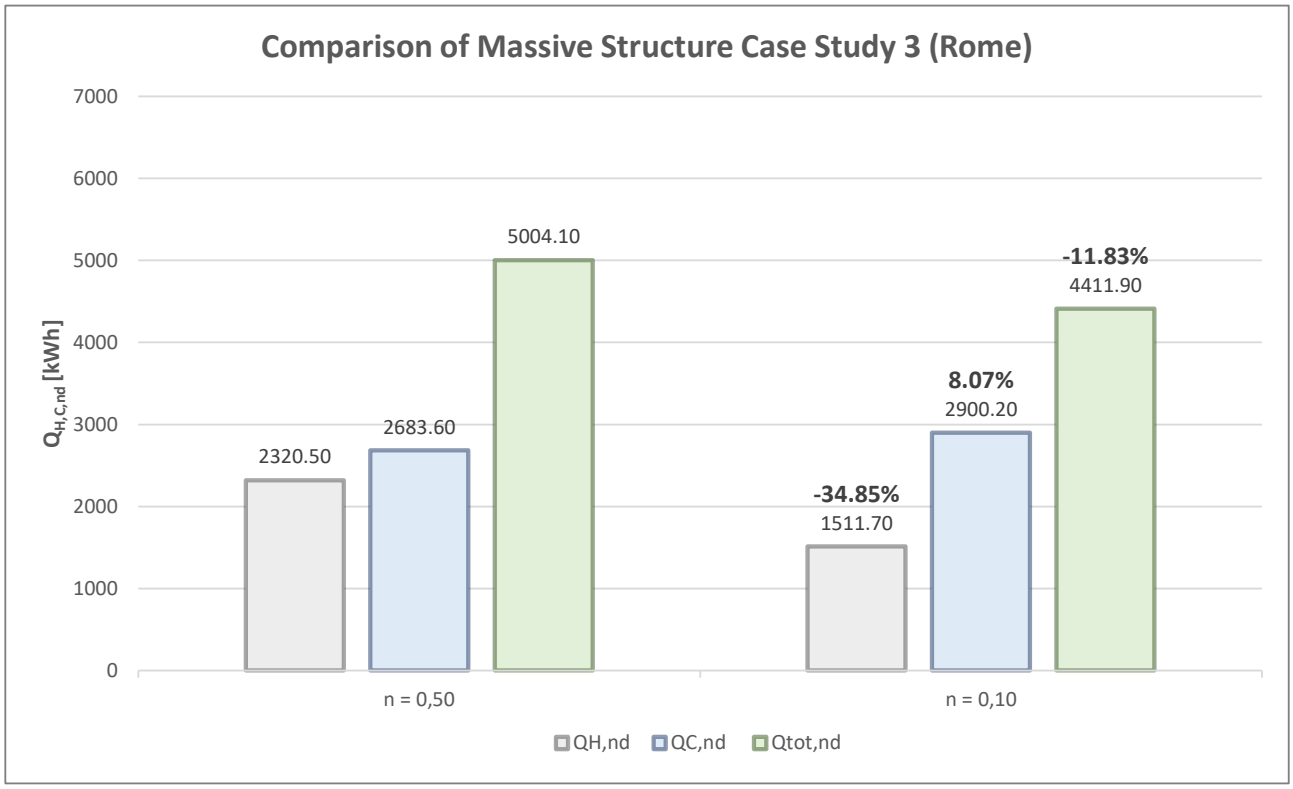

Grafico 140: Struttura Massiva, Confronto Fabbisogni di Energia Utile al Variare del Valore di n [1/h] (Caso Studio 3, Roma)

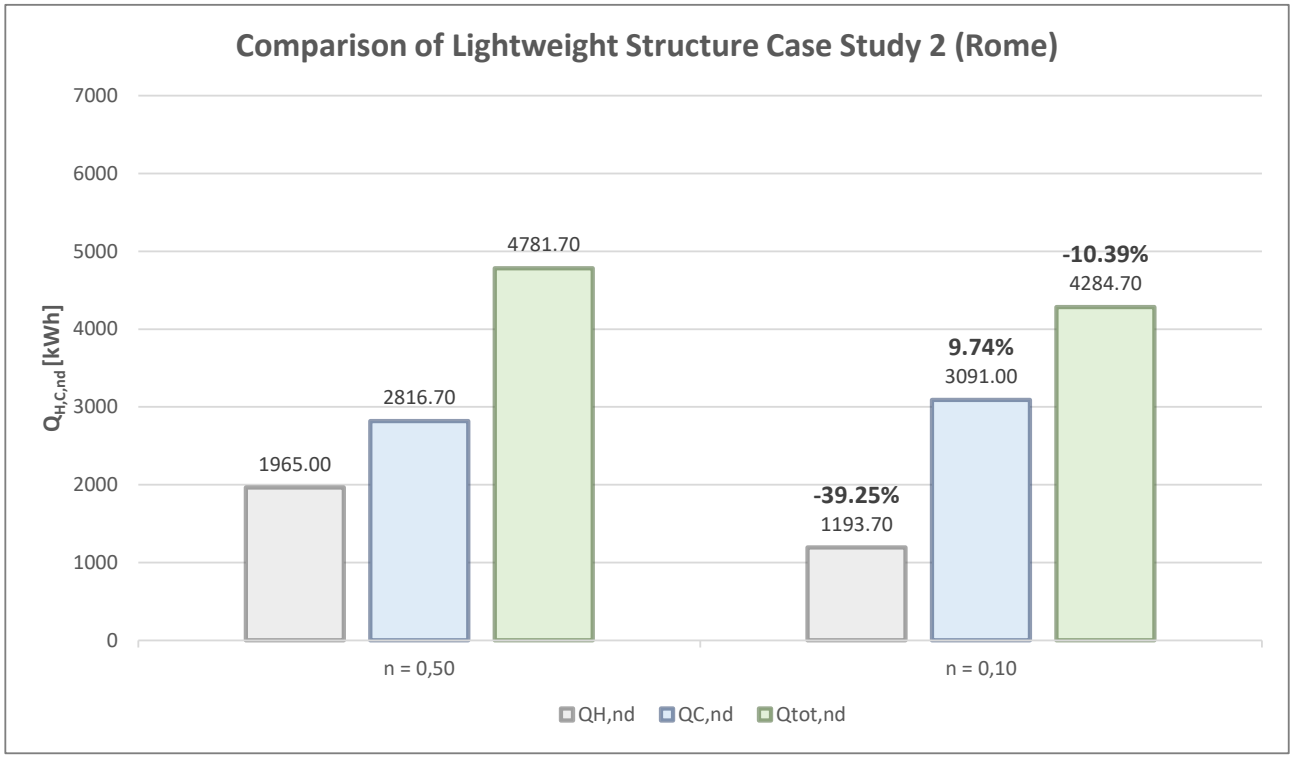

Grafico 141: Struttura Leggera, Confronto Fabbisogni di Energia Utile al Variare del Valore di n [1/h] (Caso Studio 2, Roma)

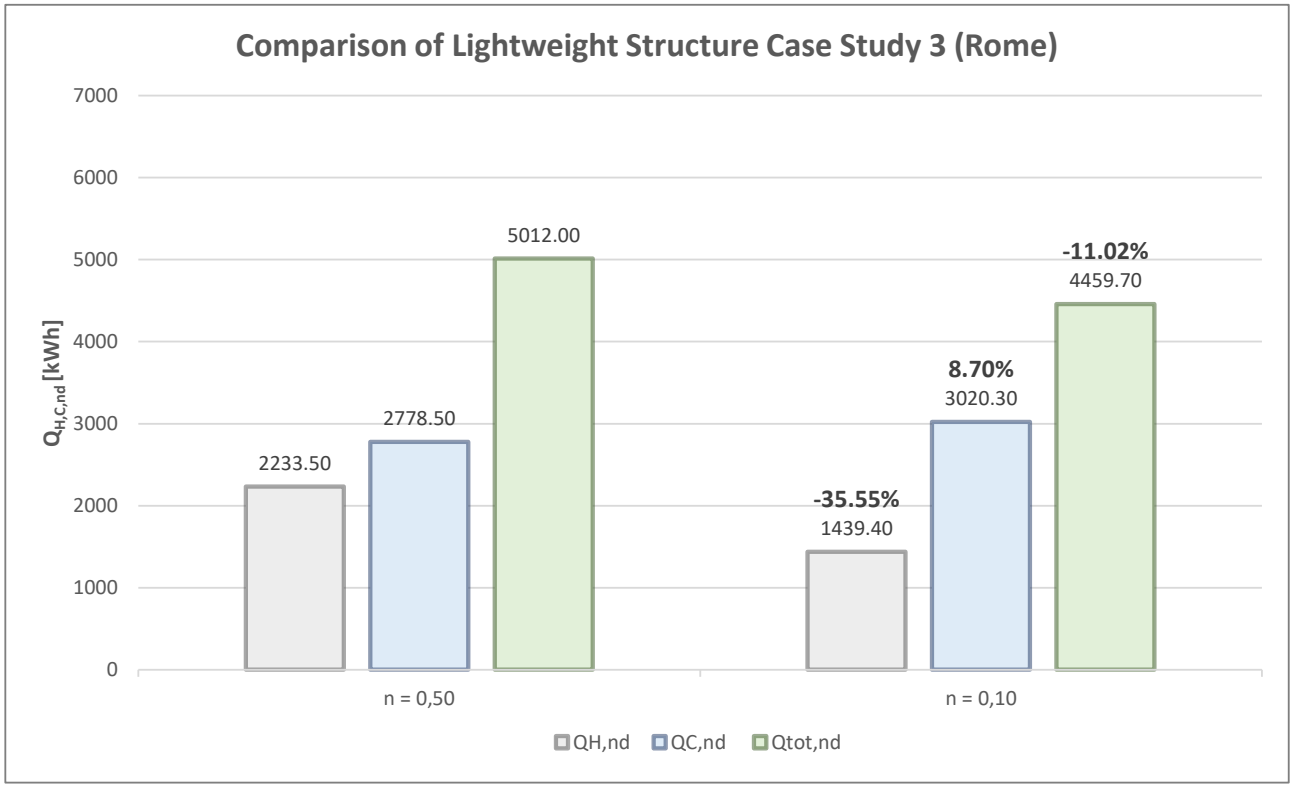

Grafico 142: Struttura Leggera, Confronto Fabbisogni di Energia Utile al Variare del Valore di n [1/h] (Caso Studio 3, Roma)

Fissando il valore di n e il caso studio, è possibile notare dai grafici precedenti come la struttura leggera abbia un fabbisogno invernale minore e un fabbisogno estivo maggiore rispetto alla struttura massiva, mentre considerando il fabbisogno di energia totale i valori risultano quasi costanti tra le due tipologie di struttura. Nelle analisi riguardanti il metodo dinamico (paragrafo 4.5.2) risulta invece che la struttura leggera abbia sempre un fabbisogno di energia maggiore rispetto alla struttura massiva, con l'unica eccezione per il fabbisogno associato al periodo estivo nel caso studio 3. In entrambi i metodi non risulta comunque evidente quale struttura abbia il comportamento energetico migliore, poiché i fabbisogni di energia totali risultano molto simili tra loro.

Fissando il valore di n e la tipologia di struttura, si nota come il fabbisogno invernale maggiore sia associato al caso studio 3 (solaio di sottotetto non isolato) mentre il fabbisogno estivo maggiore è associato al caso studio 2 (solaio di sottotetto isolato). Riguardo il fabbisogno di energia totale, esso risulta maggiore nel caso studio 3 rispetto al caso studio 2, ciò significa che nell'arco dell'anno l'edificio che risulta avere il minor fabbisogno di energia è l'edificio dotato di sottotetto isolato. Utilizzando il metodo dinamico invece (paragrafo 4.4.2) si ottiene il risultato opposto, ovvero il fabbisogno di energia totale maggiore risulta associato al caso studio 2, anche se la differenza con il caso studio 3 non è eccessiva. Questa differenza di comportamento è dovuta ai diversi metodi utilizzati: nel metodo semi stazionario risulta un fabbisogno estivo di poco superiore al fabbisogno invernale, mentre nel calcolo dinamico il fabbisogno estivo risulta di molto superiore al fabbisogno invernale. Ciò significa che nel metodo dinamico ha più peso sul fabbisogno totale di energia il vantaggio estivo dovuto alla presenza di un solaio di sottotetto non isolato.

5.2.3 Palermo

Anche in questo caso un aumento del valore di n comporta un maggiore fabbisogno di energia invernale e un minor fabbisogno di energia estivo, a prescindere dal caso studio considerato o dalla tipologia di struttura. Rispetto alle località precedenti la riduzione del fabbisogno di energia totale, ottenuta con la diminuzione di n, è molto minore. Come anticipato nel caso di Roma, ciò accade poiché il fabbisogno di energia estivo risulta molto più rilevante del fabbisogno di energia invernale. Osservando i grafici riguardanti il caso studio 2 e il caso studio 3 (sia per la struttura leggera che per la struttura massiva) si nota come la variazione di n abbia un'incidenza leggermente superiore nel caso studio 2, anche se sul fabbisogno totali le percentuali di variazione risultato circa costanti tra i due casi studio. Tra struttura massiva e struttura leggera invece la tipologia che risente maggiormente della variazione di n è la struttura massiva, anche se nuovamente la differenza tra le percentuali non risulta essere significativa.

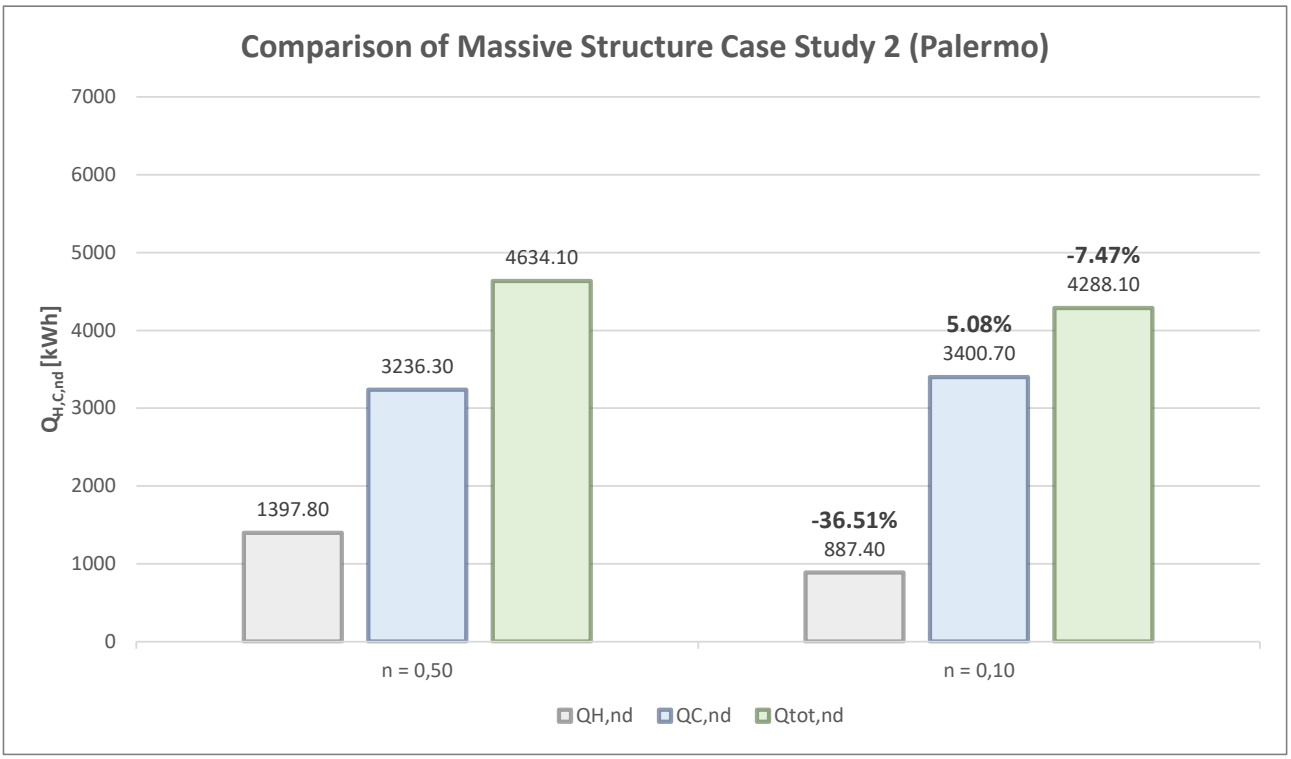

Grafico 143: Struttura Massiva, Confronto Fabbisogni di Energia Utile al Variare del Valore di n [1/h] (Caso Studio 2, Palermo)

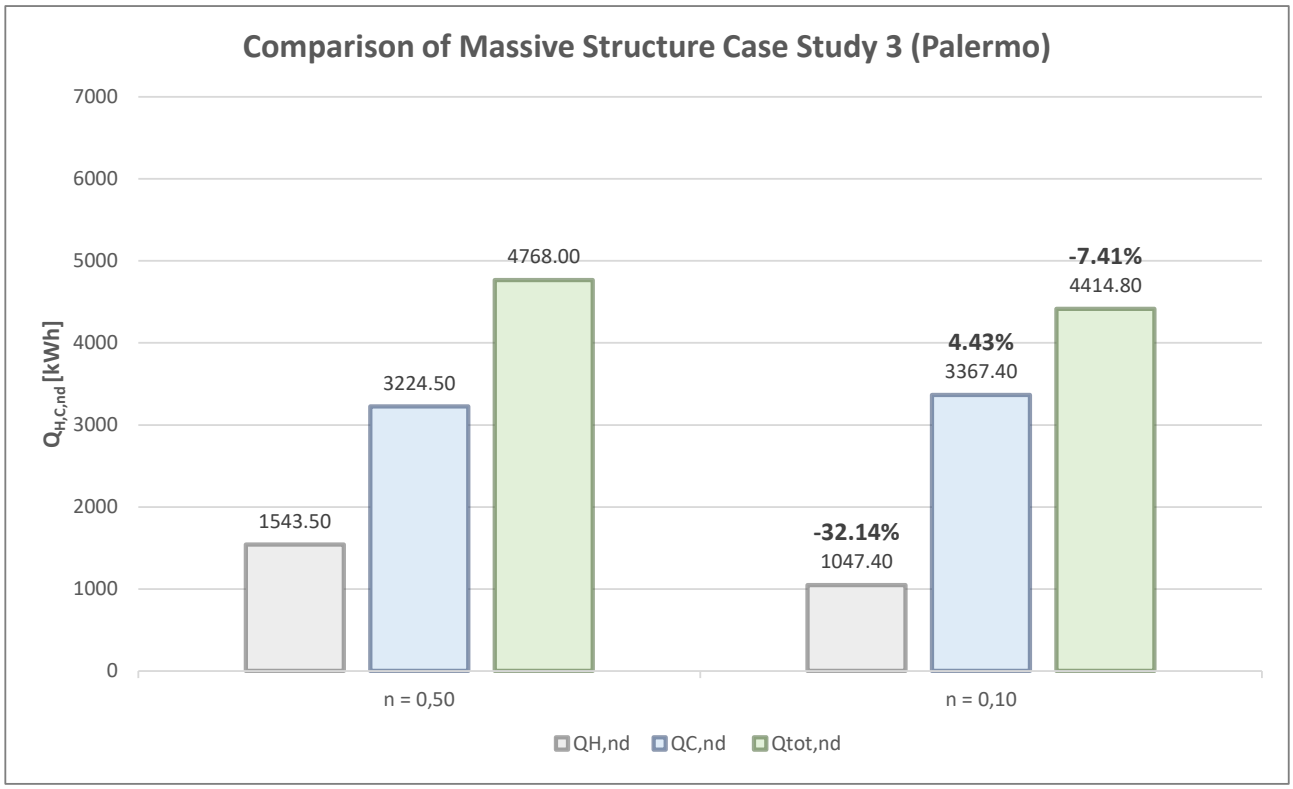

Grafico 144: Struttura Massiva, Confronto Fabbisogni di Energia Utile al Variare del Valore di n [1/h] (Caso Studio 3, Palermo)

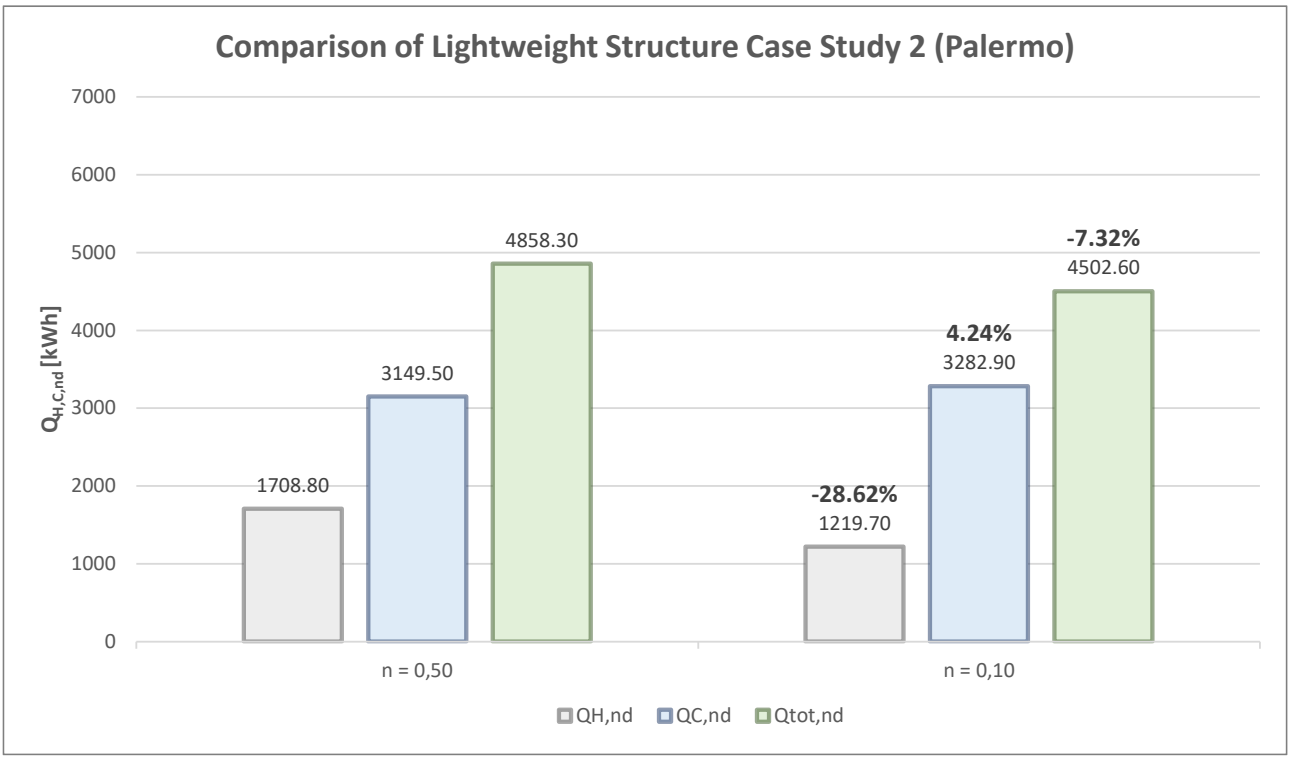

Grafico 145: Struttura Leggera, Confronto Fabbisogni di Energia Utile al Variare del Valore di n [1/h] (Caso Studio 2, Palermo)

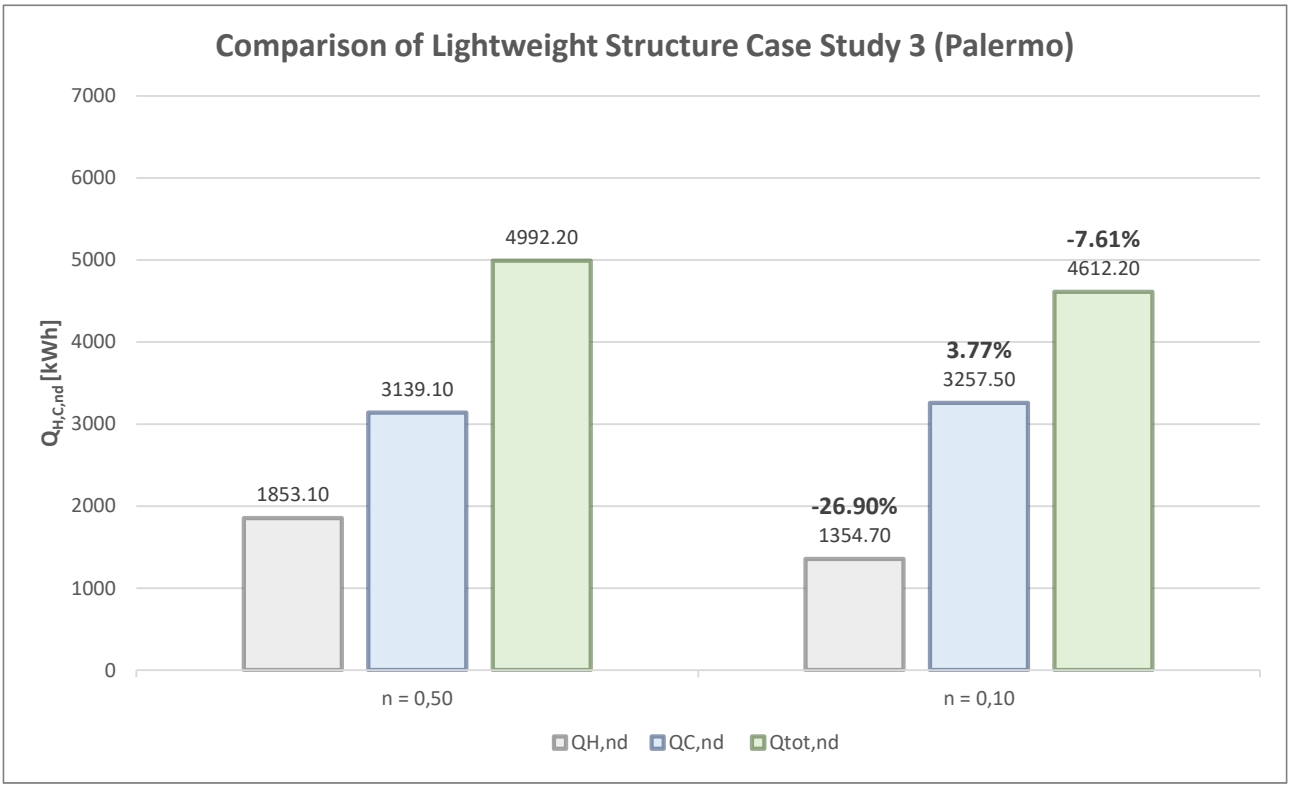

Grafico 146: Struttura Leggera, Confronto Fabbisogni di Energia Utile al Variare del Valore di n [1/h] (Caso Studio 3, Palermo)

Fissando il valore di n e il caso studio, è possibile notare dai grafici precedenti come la struttura leggera abbia un fabbisogno invernale maggiore e un fabbisogno estivo minore rispetto alla struttura massiva, inoltre il fabbisogno di energia totale maggiore risulta associato alla struttura leggera. Le stesse osservazioni,

riguardanti la località di Palermo, sono state effettuate nel paragrafo 4.5.3 utilizzando il metodo dinamico, anche se la differenza dei fabbisogni di energia tra le due tipologie di strutture risulta più evidente nel metodo semi stazionario.

Fissando il valore di n e la tipologia di struttura, si nota come il fabbisogno invernale maggiore sia associato al caso studio 3 (solaio di sottotetto non isolato) mentre il fabbisogno estivo risulta circa costante tra i due caso studio. Riguardo il fabbisogno di energia totale, esso risulta maggiore nel caso studio 3 rispetto al caso studio 2, ciò significa che nell'arco dell'anno l'edificio che risulta avere il minor fabbisogno di energia è l'edificio dotato di sottotetto isolato. In questo caso le stesse osservazioni sono state effettuate utilizzando il metodo di calcolo dinamico (paragrafo 4.4.3), dove però era meno evidente la differenza di fabbisogno totale associato ai due casi studio, rendendo la scelta della posizione dell'isolamento indifferente da un punto di vista dei fabbisogni.

5.2.4 Conclusioni

Utilizzando il metodo semi stazionario riportato nella norma UNI TS 11300-1 si ottiene che un aumento di n corrisponde ad un aumento di fabbisogno di energia per il riscaldamento e a una diminuzione di fabbisogno di energia per il raffrescamento, tale diminuzione risulta però meno significativa rispetto all'aumento che si verifica nel periodo invernale. L'incidenza di n sul fabbisogno di energia totale invece dipenderà dall'entità dei fabbisogni: per fabbisogni estivi ridotti e fabbisogni invernali elevati, la riduzione di n comporterà un minor fabbisogno di energia totale rispetto al fabbisogno totale che si avrebbe con un n più elevato, mentre per fabbisogni estivi elevati e fabbisogni invernali ridotti, la riduzione di n comporterà un maggior fabbisogno di energia totale. Riguardo al confronto dell'andamento dei fabbisogni di energia tra metodo semi stazionario e dinamico, si sono ottenuti i medesimi risultati ad eccezione di qualche differenza sulla località di Roma.

5.3 Valutazione Del Fabbisogno di Energia Utile in Funzione del Grado di Ventilazione dell'Ambiente di Sottotetto

Nel seguente paragrafo si analizzerà l'incidenza della ventilazione della zona termica non riscaldata di sottotetto sui fabbisogni di energia utile, determinati mediante il metodo di calcolo riportato nella norma UNI TS 11300-1. L'analisi coinvolgerà il piano primo del caso studio 2 e del caso studio 3, considerando sia la struttura massiva che la struttura leggera. Non viene considerato l'interno edificio poiché sicuramente il primo piano sarà maggiormente influenzato dalla variazione di ventilazione del sottotetto rispetto all'edificio nella sua completezza. Nel primo caso si è fissato un tasso di ricambio d'aria del sottotetto pari a 0,50 mentre nel secondo caso, con lo scopo di aumentare la portata d'aria del sottotetto, è stato fissato pari a 0,70. Il volume interno del sottotetto risulta pari a 49,67 m^3.

5.3.1 Milano

Osservando i seguenti grafici è possibile notare come nel caso studio 2, per entrambe le tipologie di strutture, la variazione del tasso di ricambio d'aria del sottotetto non incide in maniera evidente sui fabbisogni di energia utile, i quali si mantengono circa costanti. Nel caso studio 3 invece, seppur non in modo particolarmente significativo, si nota che all'aumentare della portata d'aria del sottotetto il fabbisogno invernale aumenta, mentre il fabbisogno estivo diminuisce. Considerando il fabbisogno di energia totale, esso aumenta all'aumentare della portata d'aria del sottotetto.

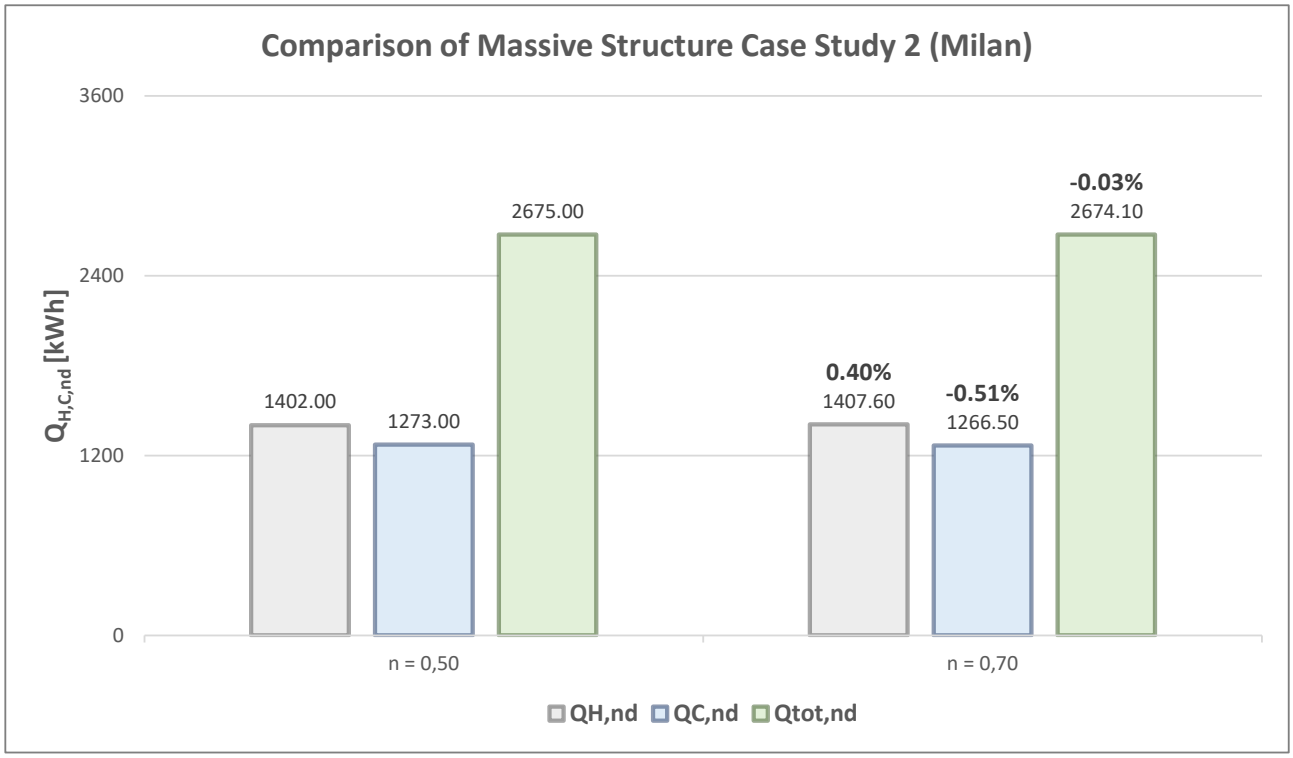

Grafico 147: Struttura Massiva, Confronto Fabbisogni di Energia Utile al Variare del Valore di n [1/h] Associato alla Zona Termica Non Riscaldata del Sottotetto (Caso Studio 2, Milano)

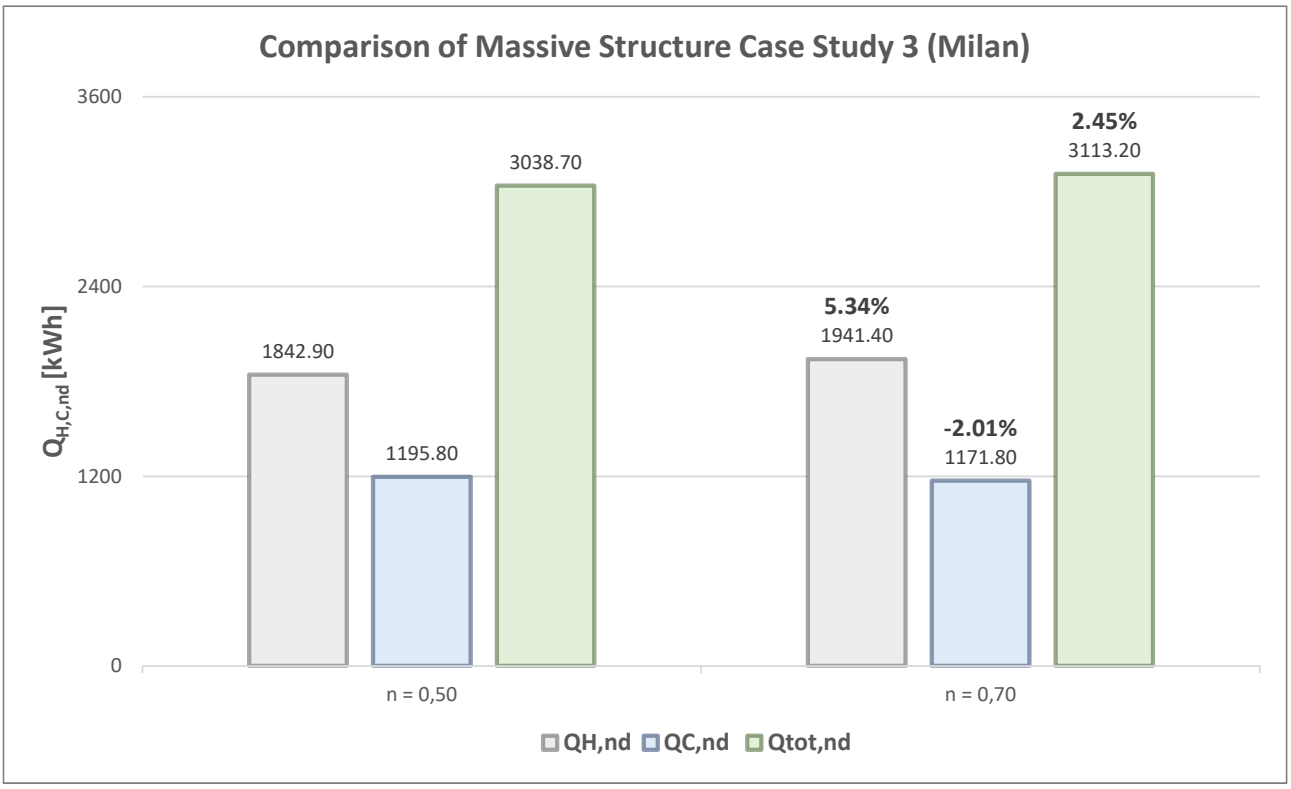

Grafico 148: Struttura Massiva, Confronto Fabbisogni di Energia Utile al Variare del Valore di n [1/h] Associato alla Zona Termica Non Riscaldata del Sottotetto (Caso Studio 3, Milano)

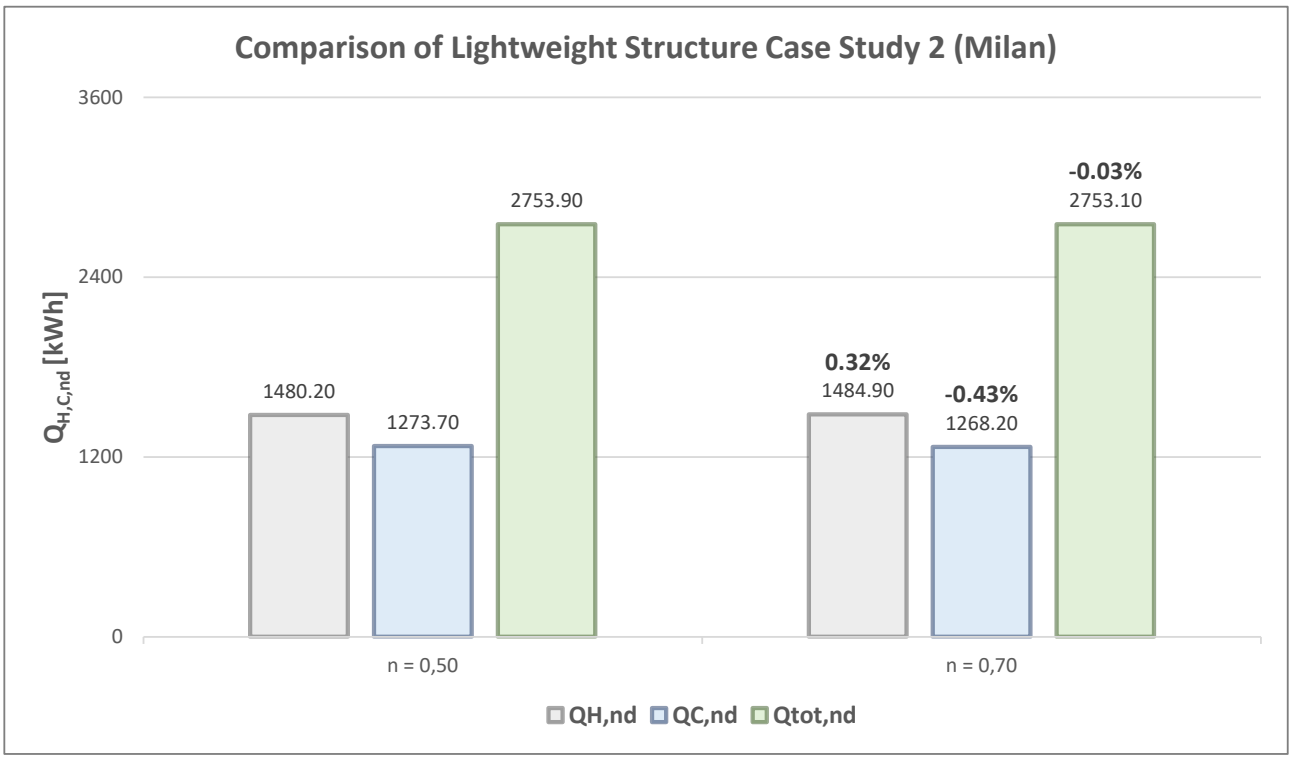

Grafico 149: Struttura Leggera, Confronto Fabbisogni di Energia Utile al Variare del Valore di n [1/h] Associato alla Zona Termica Non Riscaldata del Sottotetto (Caso Studio 2, Milano)

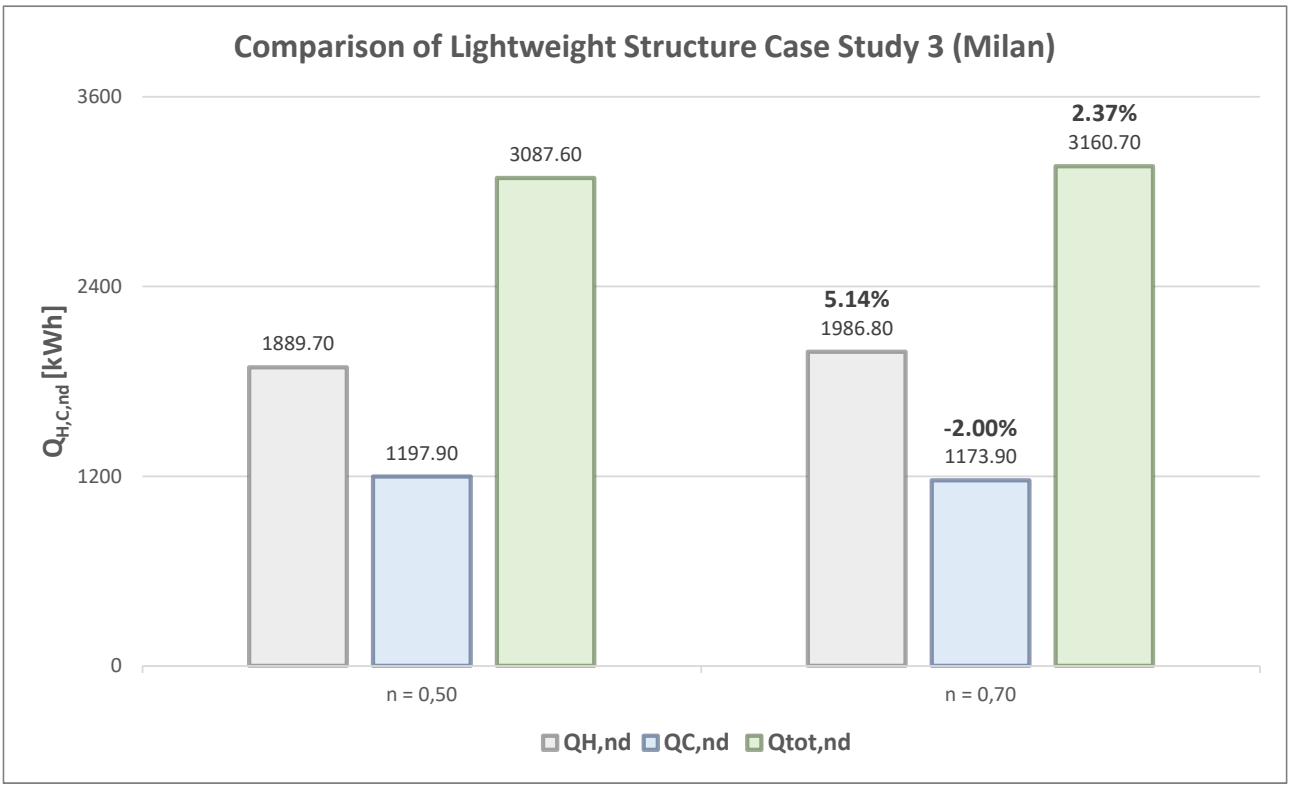

Grafico 150: Struttura Leggera, Confronto Fabbisogni di Energia Utile al Variare del Valore di n [1/h] Associato alla Zona Termica Non Riscaldata del Sottotetto (Caso Studio 3, Milano)

5.3.2 Roma

Per entrambe le tipologie di strutture si verifica ciò già osservato per la località di Milano, ovvero nel caso studio 2 i fabbisogni di energia utile si mantengono circa costanti con la variazione del tasso di ricambio d'aria del sottotetto, mentre nel caso studio 3 si nota un aumento del fabbisogno invernale e una diminuzione del fabbisogno estivo all'aumentare della portata d'aria del sottotetto. In questo caso l'aumento del fabbisogno totale di energia risulta minore rispetto a quello che si verifica nella località di Milano. Ciò è dovuto ad un aumento del fabbisogno estivo rispetto al fabbisogno invernale, come analizzato anche nel paragrafo precedente. Questo significa che, per fabbisogni estivi elevati e fabbisogni invernali ridotti, una maggiore portata d'aria del sottotetto favorisce una diminuzione del fabbisogno totale di energia durante l'arco dell'anno.

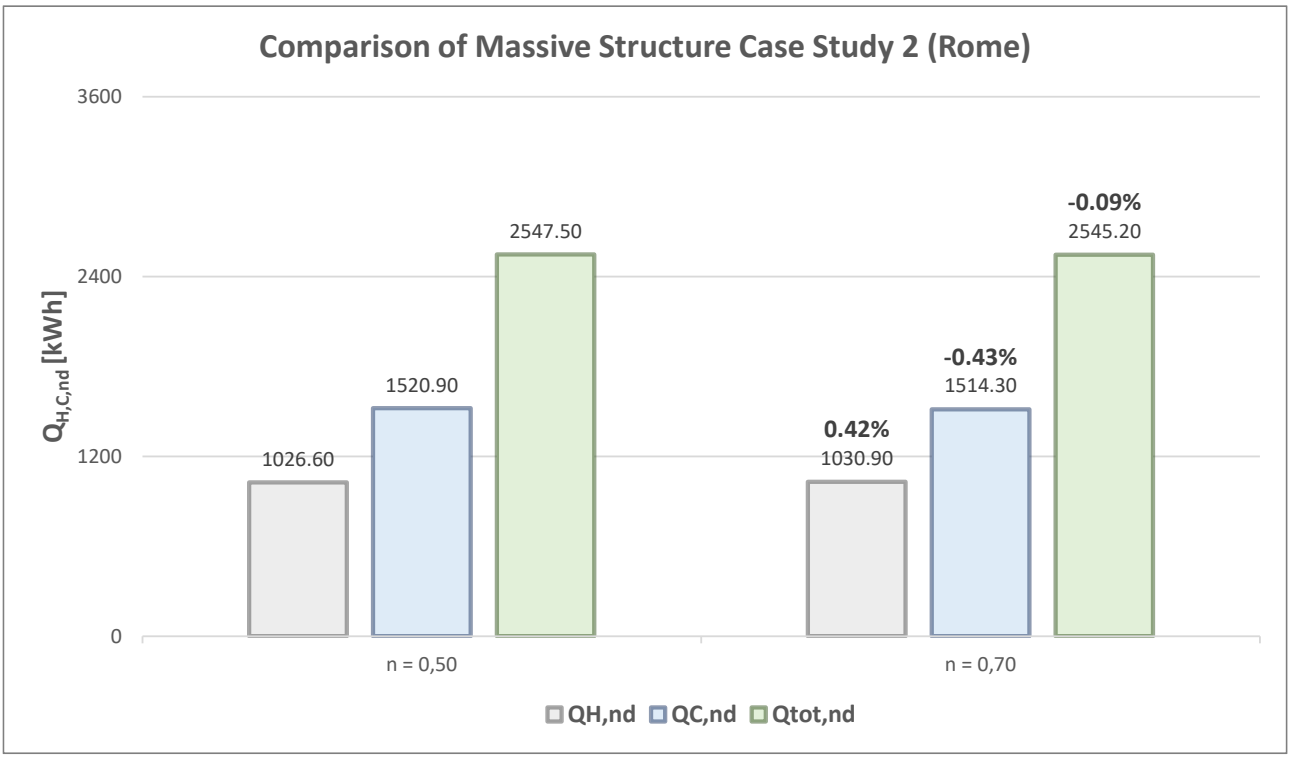

Grafico 151: Struttura Massiva, Confronto Fabbisogni di Energia Utile al Variare del Valore di n [1/h] Associato alla Zona Termica Non Riscaldata del Sottotetto (Caso Studio 2, Roma)

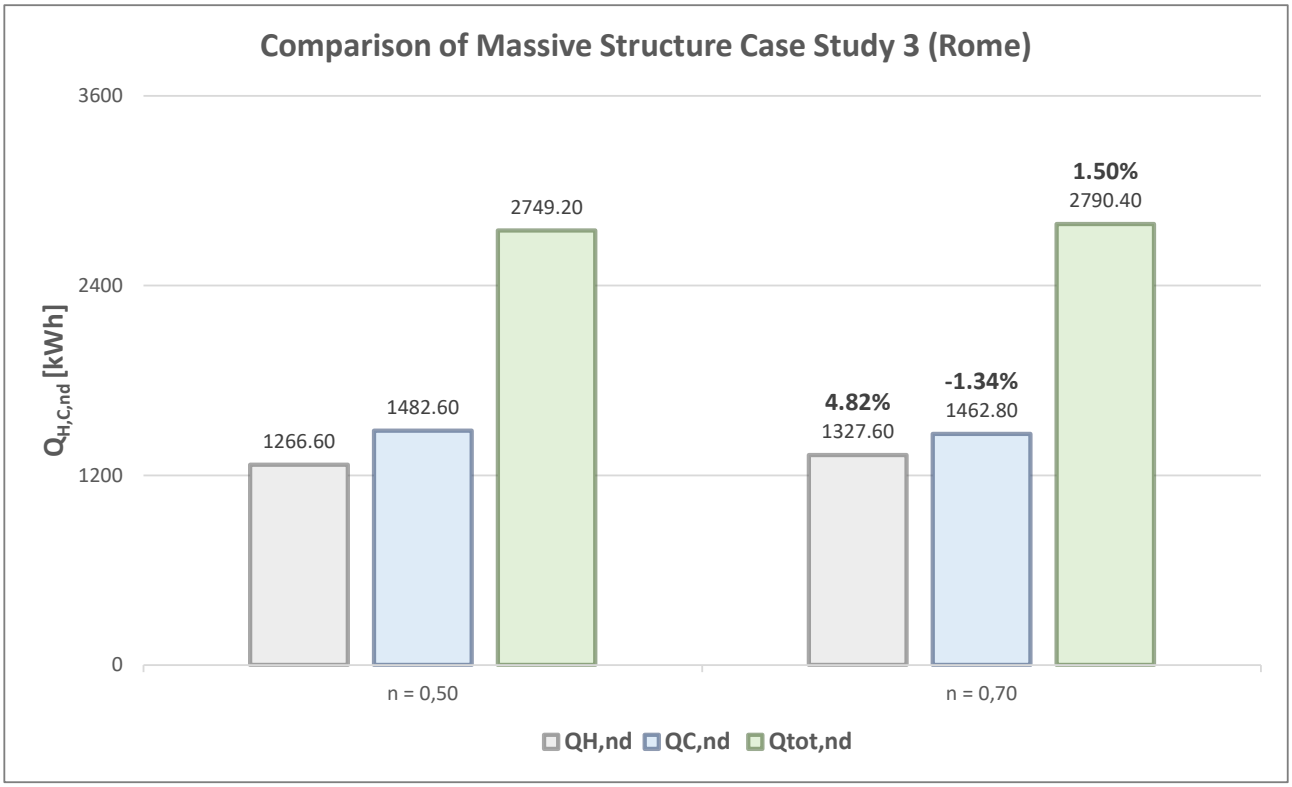

Grafico 152: Struttura Massiva, Confronto Fabbisogni di Energia Utile al Variare del Valore di n [1/h] Associato alla Zona Termica Non Riscaldata del Sottotetto (Caso Studio 3, Roma)

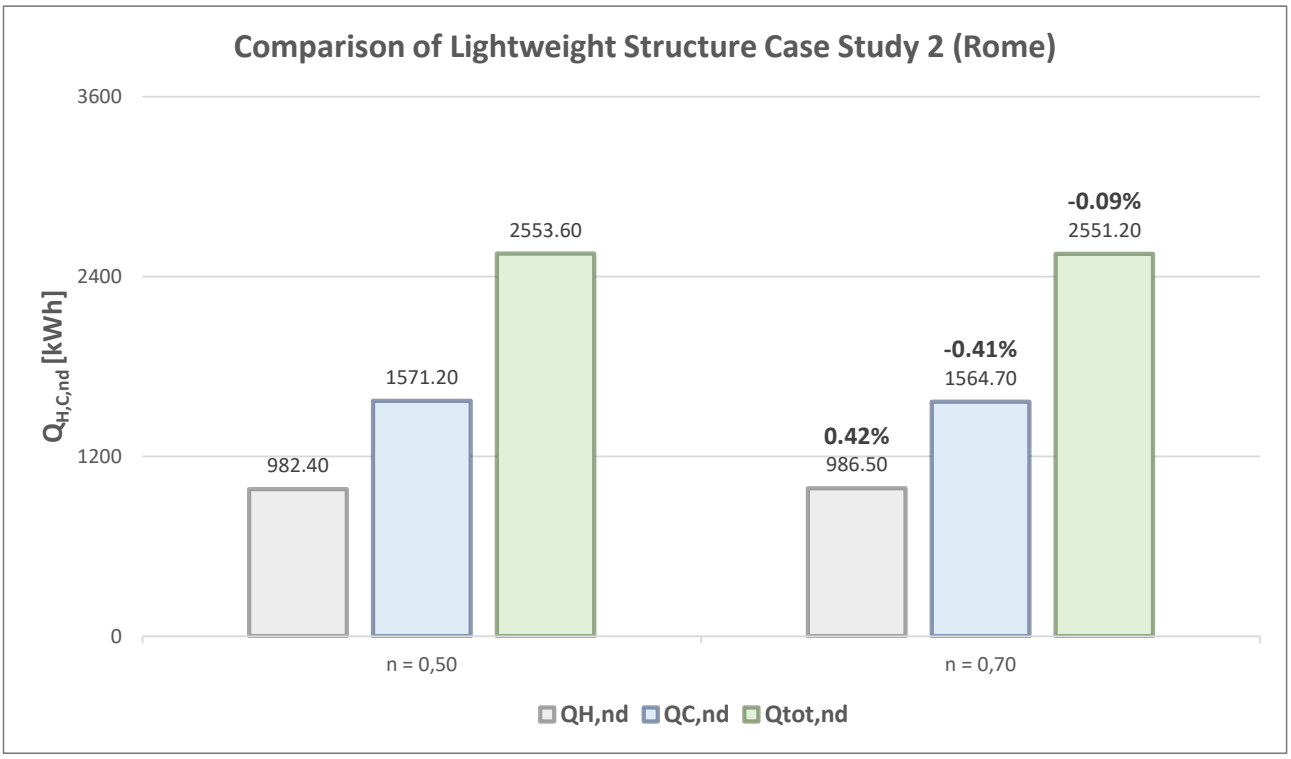

Grafico 153: Struttura Leggera, Confronto Fabbisogni di Energia Utile al Variare del Valore di n [1/h] Associato alla Zona Termica Non Riscaldata del Sottotetto (Caso Studio 2, Roma)

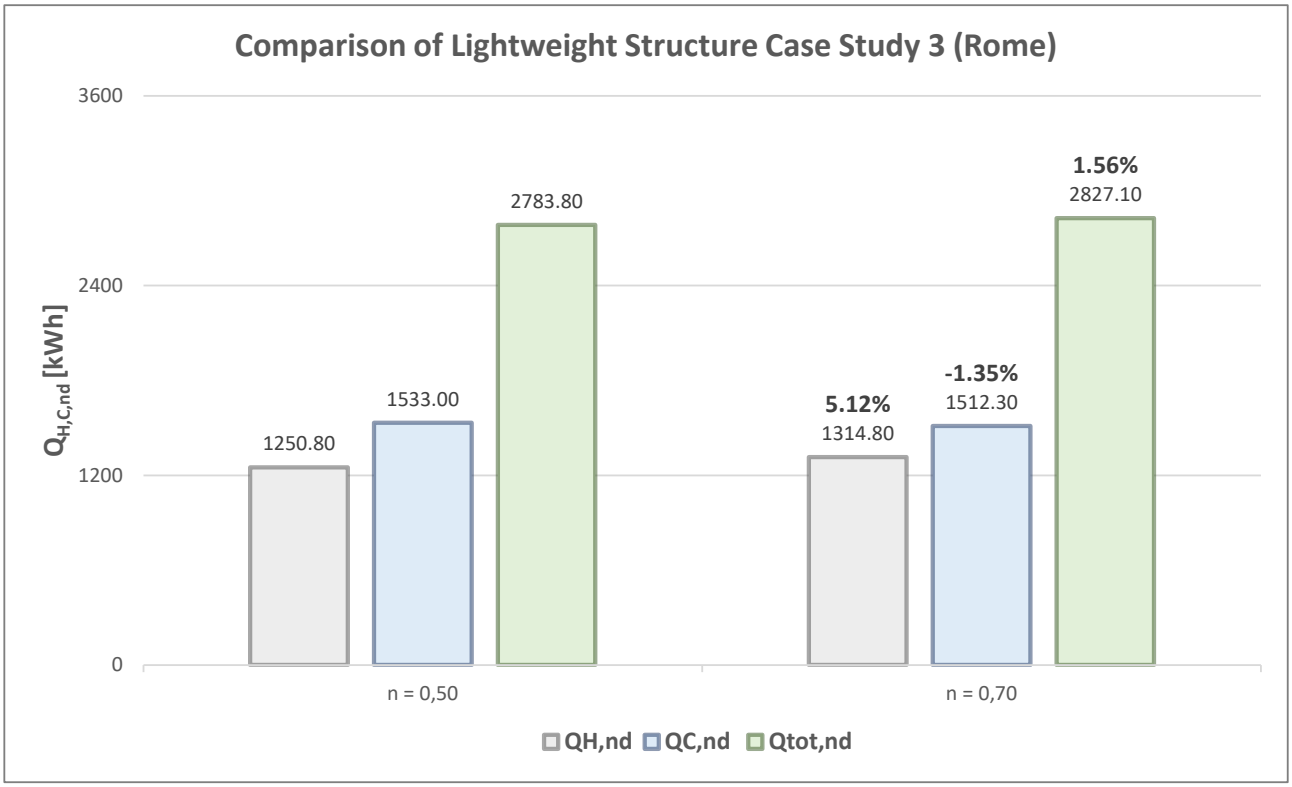

Grafico 154: Struttura Leggera, Confronto Fabbisogni di Energia Utile al Variare del Valore di n [1/h] Associato alla Zona Termica Non Riscaldata del Sottotetto (Caso Studio 3, Roma)

5.3.3 Palermo

Per entrambe le tipologie di strutture si verifica nuovamente ciò già osservato per le località precedenti, ovvero nel caso studio 2 i fabbisogni di energia utile si mantengono circa costanti con la variazione del tasso di ricambio d'aria del sottotetto, mentre nel caso studio 3 si nota un aumento del fabbisogno invernale e una diminuzione del fabbisogno estivo all'aumentare della portata d'aria del sottotetto. In questo caso l'aumento del fabbisogno totale di energia risulta minore sia rispetto a Roma che a Milano, questo accade poiché il fabbisogno di energia estivo riferito alla località di Palermo risulta superiore rispetto ai fabbisogni estivi associati a Roma e a Milano, al contrario del fabbisogno di energia invernale che risulta essere molto minore rispetto ai casi precedenti.

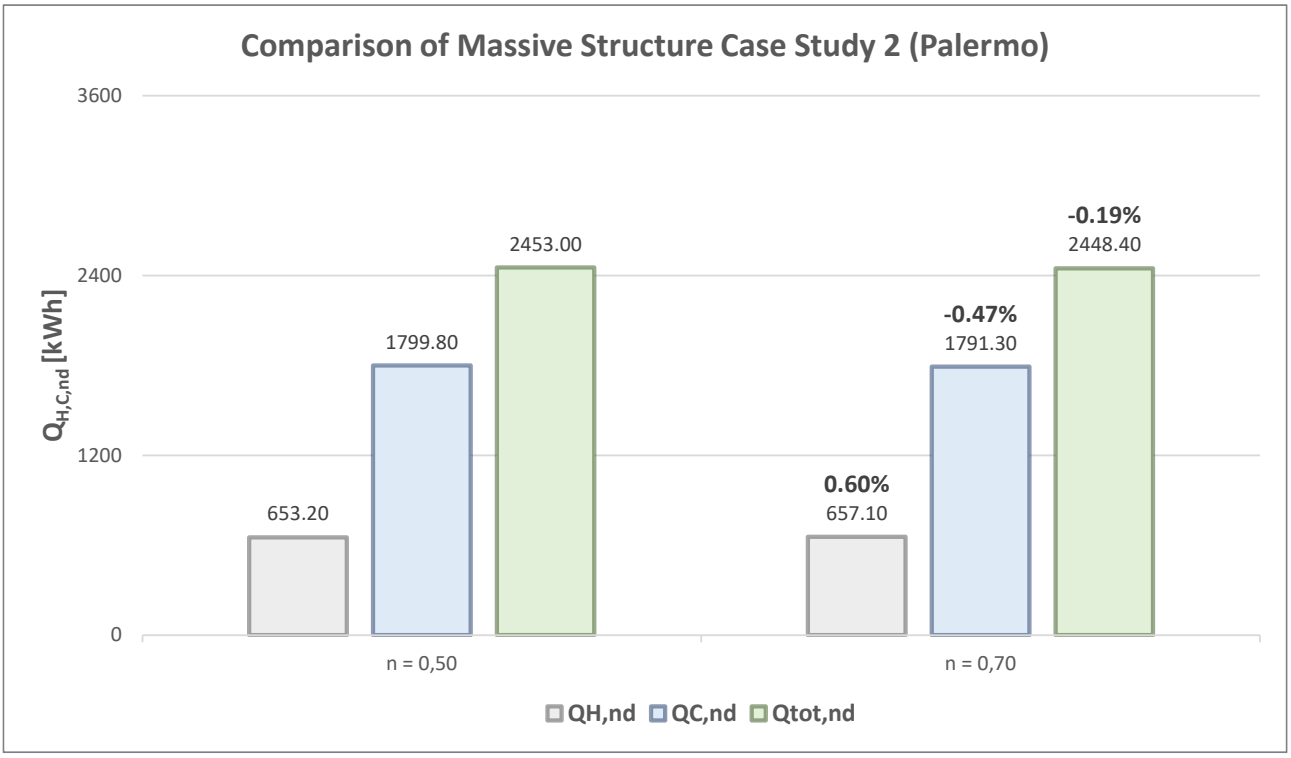

Grafico 155: Struttura Massiva, Confronto Fabbisogni di Energia Utile al Variare del Valore di n [1/h] Associato alla Zona Termica Non Riscaldata del Sottotetto (Caso Studio 2, Palermo)

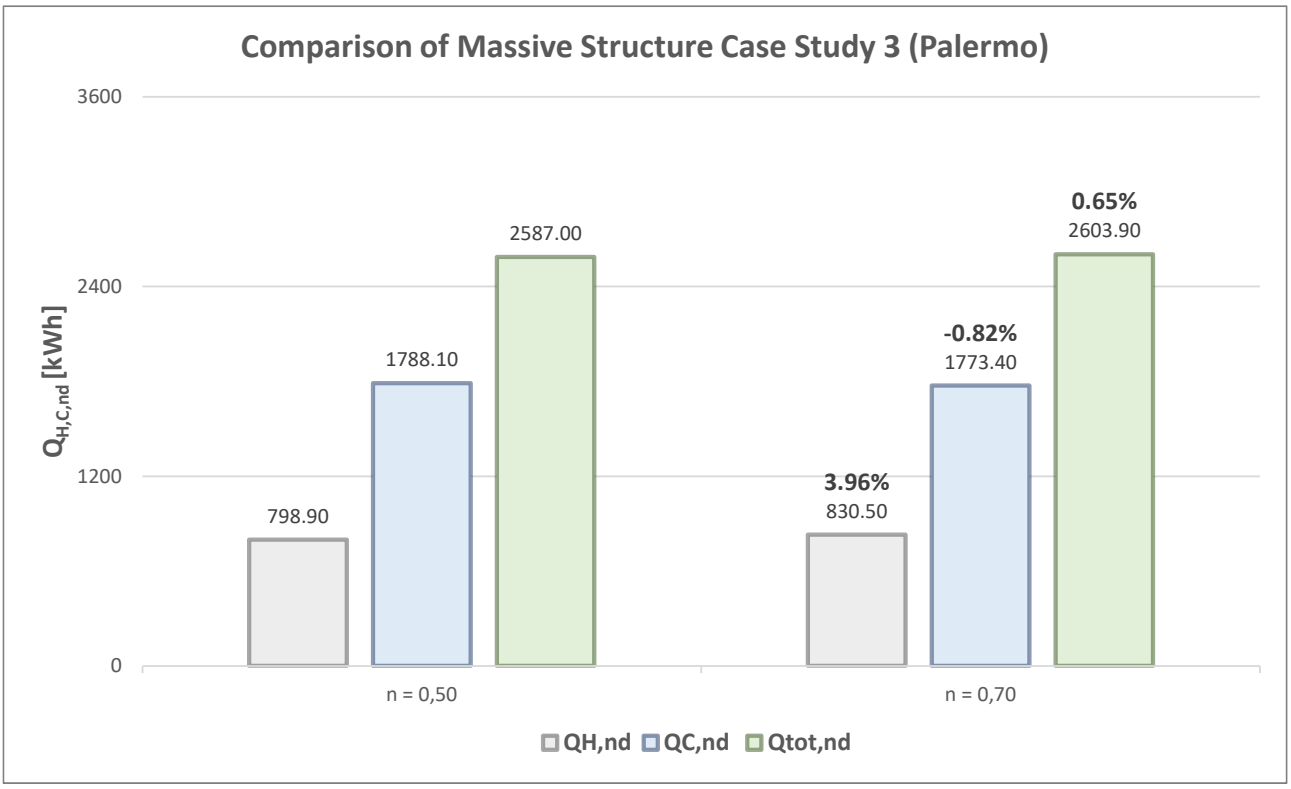

Grafico 156: Struttura Massiva, Confronto Fabbisogni di Energia Utile al Variare del Valore di n [1/h] Associato alla Zona Termica Non Riscaldata del Sottotetto (Caso Studio 3, Palermo)

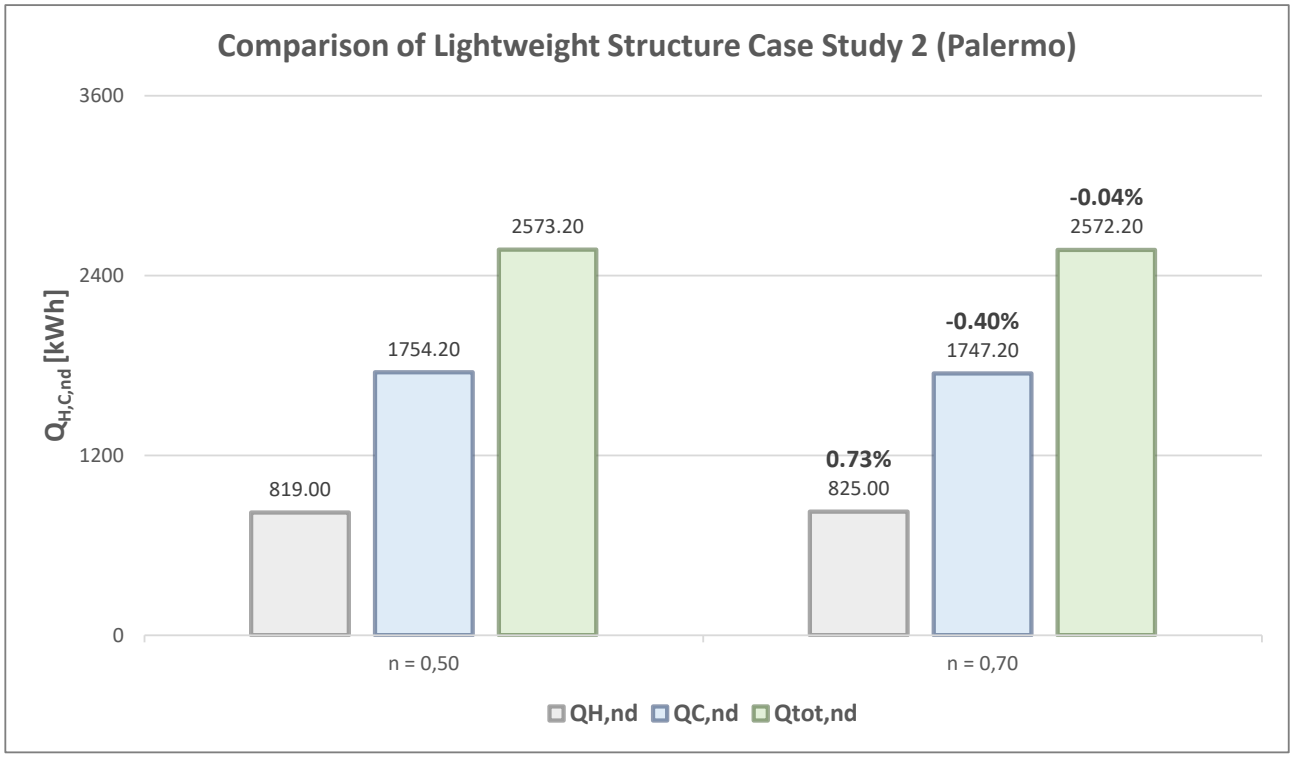

Grafico 157: Struttura Leggera, Confronto Fabbisogni di Energia Utile al Variare del Valore di n [1/h] Associato alla Zona Termica Non Riscaldata del Sottotetto (Caso Studio 2, Palermo)

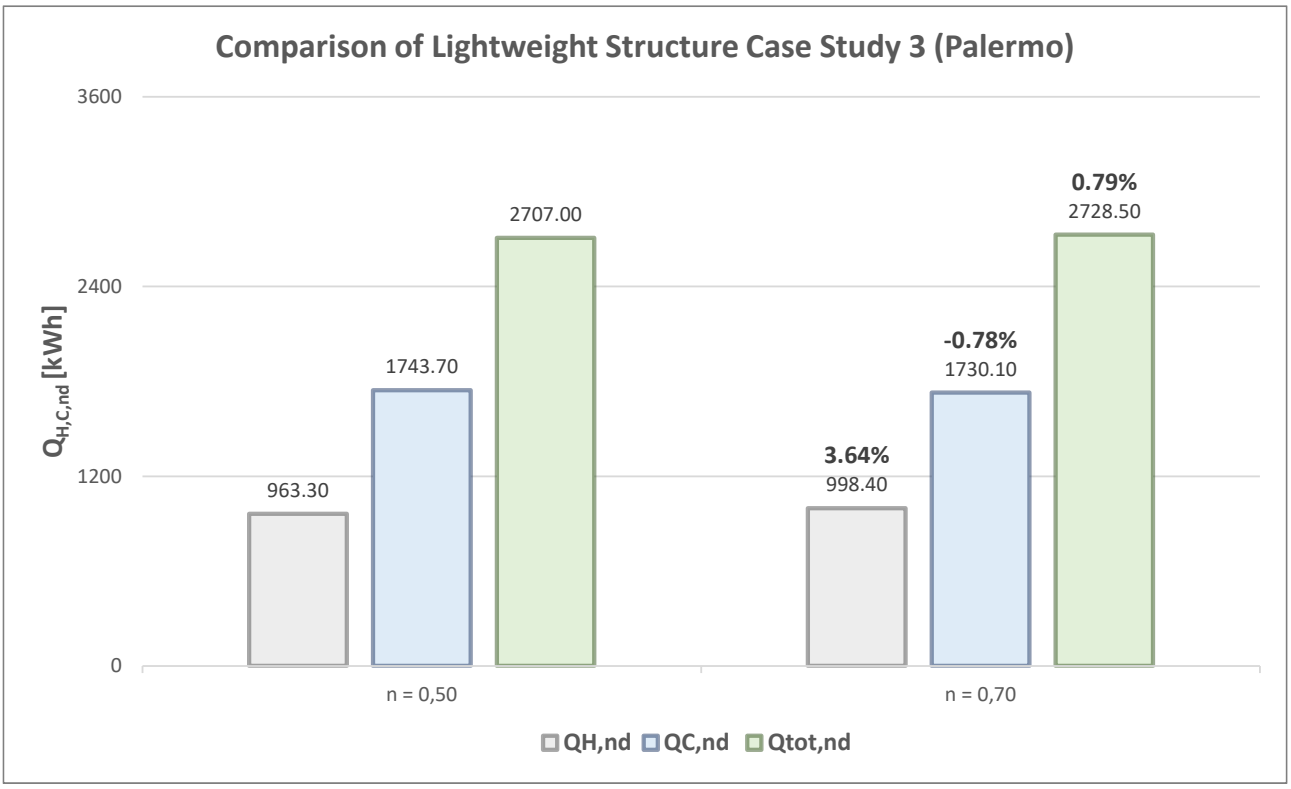

Grafico 158: Struttura Leggera, Confronto Fabbisogni di Energia Utile al Variare del Valore di n [1/h] Associato alla Zona Termica Non Riscaldata del Sottotetto (Caso Studio 3, Palermo)

5.3.4 Conclusioni

Utilizzando il metodo semi stazionario riportato nella norma UNI TS 11300-1 si è determinato che la variazione del tasso di ricambio d'aria del sottotetto non incide in maniera significativa nel caso in cui il solaio di sottotetto risulti isolato, mentre nel caso di solaio di sottotetto non isolato si nota un aumento del fabbisogno invernale e una diminuzione del fabbisogno estivo all'aumentare della portata d'aria del sottotetto. L'andamento del fabbisogno di energia totale dipenderà dall'entità dei fabbisogni: per fabbisogni estivi ridotti e fabbisogni invernali elevati, l'aumento di portata d'aria comporterà un maggior fabbisogno di energia totale, mentre per fabbisogni estivi elevati e fabbisogni invernali ridotti, l'aumento di portata d'aria comporterà un minor fabbisogno di energia totale.

6. CONCLUSIONI

Attraverso l'applicazione del metodo dinamico orario sono state effettuate delle analisi riguardanti tipologie di strutture caratterizzate da inerzia termica differente per tre casi studio. È stato valutato l'andamento dei fabbisogni di energia (a livello qualitativo e tramite analisi statistica), il comfort interno e la variazione della temperatura operativa causata dall'intermittenza dell'impianto di riscaldamento. Mentre, attraverso l'applicazione del metodo semi stazionario, sono state realizzate le certificazioni energetiche, le verifiche di rispondenza ai requisiti di legge (D.lgs 192/2015 e DM 26/06/2016) e le verifiche per usufruire dell'incentivo fiscale (Legge n.77 del 17 luglio 2020) delle simulazioni effettuate con il metodo dinamico, inoltre state realizzate delle analisi riguardanti la costante di tempo e l'andamento dei fabbisogni di energia in funzione della variazione della ventilazione.

Analizzando i risultati ottenuti attraverso l'analisi statistica riguardante i pesi associati ai parametri termo-fisici caratterizzanti gli elementi di involucro, si evince che la trasmittanza termica è il parametro che più influenza i fabbisogni di energia (precisando però che il suo peso diminuisce di circa il 22% nella stima del fabbisogno estivo rispetto a quello invernale), seguita dalla massa superficiale e dalla trasmittanza termica periodica, mentre lo sfasamento e la capacità termica interna areica risultano essere generalmente i parametri meno influenti sia nel calcolo del fabbisogno invernale che in quello estivo. Effettuare un'analisi di questo tipo considerando un numero di strutture maggiore, porterebbe a risultati ancora più precisi e applicabili in sede di progettazione, dando precedenza in funzione della località climatica ai parametri termo-fisici che più influenzano il comportamento termico dell'edificio.

Invece, analizzando i risultati ottenuti dalle analisi riguardanti il comfort interno e la variazione di temperatura operativa in funzione dell'accensione e dello spegnimento dell'impianto di riscaldamento, si è determinato il comportamento nella stagione estiva ed invernale di strutture caratterizzate da inerzia termica diversa. La struttura leggera risulta essere la soluzione che garantisce un maggior numero di ore di comfort nel periodo estivo, mentre nel periodo invernale risente maggiormente dell'intermittenza dell'impianto rispetto alla struttura massiva. In particolare, nel periodo invernale la temperatura operativa associata alla struttura leggera tende a diminuire maggiormente durante lo spegnimento dell'impianto, comportando un aumento della potenza necessaria per il raggiungimento del set-point e del tempo di ripresa rispetto alla struttura massiva. Da questi risultati emerge una criticità nell'utilizzo del metodo dinamico orario nel periodo estivo, poiché sembra non riuscire a valorizzare il comportamento di una struttura massiva rispetto ad una struttura leggera. Nelle analisi riguardanti il fabbisogno di energia utile per il raffrescamento e il comfort termico valutato nel periodo estivo mediante il modello adattivo, il comportamento termico migliore risulta associato alla struttura leggera piuttosto che a quella massiva. Una struttura massiva dovrebbe essere in grado di sfasare maggiormente l'onda termica e quindi di risentire in modo minore del cambiamento delle condizioni climatiche rispetto ad una struttura leggera. Questo aspetto sembra non essere significativamente apprezzato dal metodo dinamico nel periodo estivo, probabilmente ciò è dovuto ad una gestione non adeguata dei carichi impulsivi dovuti alla radiazione solare entrante attraverso le superfici vetrate. Quest'ultimo aspetto può portare ad una valutazione errata della temperatura media radiante riferita ai nodi superficiali delle strutture rivolti verso l'ambiente interno, da ciò conseguirebbe una valutazione non adeguata della temperatura operativa e quindi dei fabbisogni di energia.

Analizzando i risultati ricavati mediante l'applicazione del metodo semi stazionario riguardanti la costante di tempo, si va a confermare quanto determinato nell'analisi dinamica della variazione della temperatura operativa a seguito dell'intermittenza dell'impianto. La costante di tempo permette di acquisire informazioni sul comportamento termico di un edificio. In particolare, edifici con costante di tempo elevata permettono di avere un minor decadimento di temperatura, necessitando di una minore potenza richiesta all'accensione dell'impianto e di un minore tempo di ripresa. Poiché la struttura massiva risulta caratterizzata da una

costante di tempo maggiore rispetto alla struttura leggera, si conferma quanto analizzato con il regime di calcolo dinamico orario.

L'eventuale sviluppo futuro di tale lavoro sarà verificare come differiscono le temperature medie radianti associate ai nodi superficiali riguardanti strutture caratterizzate da inerzia termica diversa e come la zona termica gestisce il carico impulsivo dato dalla radiazione solare entrante nel periodo estivo.