Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO

Influenza del comportamento dell'utente sui consumi energetici degli edifici. Sistemi impiantistici ad alta efficienza energetica operanti con basse differenze di temperatura: abaco delle soluzioni, metodi di dimensionamento e nuove tecnologie; Materiali superisolanti per l'edilizia

(IEA – ECB ANNEX 66, 59, 65)

M. Perino, S.P. Corgnati, V. Fabi
M. Perino, S.P. Corgnati, E. Fabrizio, A. Capozzoli, V. Monetti, G. Serale
M. Perino, A. Capozzoli, S. Fantucci, A. Lorenzati, F. Isaia

POLITECNICO DI TORINO

Report RdS/PAR2014/064

INFLUENZA DEL COMPORTAMENTO DELL'UTENTE SUI CONSUMI ENERGETICI DEGLI EDIFICI; SISTEMI IMPIANTISTICI AD ALTA EFFICIENZA ENERGETICA OPERANTI CON BASSE DIFFERENZE DI TEMPERATURA: ABACO DELLE SOLUZIONI, METODI DI DIMENSIONAMENTO E NUOVE TECNOLOGIE; MATERIALI SUPERISOLANTI PER L'EDILIZIA

(IEA – ECB ANNEX 66, 59, 65)

M. Perino, S.P. Corgnati, V. Fabi
M. Perino, S.P. Corgnati, E. Fabrizio, A. Capozzoli, V. Monetti, G. Serale
M. Perino, A. Capozzoli, S. Fantucci, A. Lorenzati, F. Isaia

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico
Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2014
Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica
Progetto: Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico
Obiettivo: Edifici pubblici tipo, Indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio ad uso ufficio e scuole, Applicabilità di tecnologie innovative e modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica
Responsabile del Progetto: arch. Gaetano Fasano, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Valutazioni di prestazione energetica degli edifici residenziali e non residenziali e sviluppo di metodologie per la valutazione dei consumi energetici"
Responsabile scientifico ENEA: arch. Gaetano Fasano
Responsabile scientifico Politecnico di Torino : prof. Marco Perino, Stefano Corgnati

Indice

SOMMARIO 4

1 INTRODUZIONE 7

1.1 ATTIVITÀ A 7
1.2 ATTIVITÀ B 8
1.3 ATTIVITÀ C 9

2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI 10

2.1 APPROFONDIMENTO A1 10
2.2 APPROFONDIMENTO B1 (IL CONCEPT DELL'IDEA) 18
2.3 APPROFONDIMENTO B2 (LA CARATTERIZZAZIONE DEL MATERIALE) 23
2.4 APPROFONDIMENTO C1 (DEFINIZIONE DI METODI SPERIMENTALI PER LA VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI TERMICHE A SCALA DI MATERIALE) 25
2.5 APPROFONDIMENTO C1 (DEFINIZIONE DI METODI SPERIMENTALI PER LA VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI TERMICHE A SCALA DI MATERIALE) 27
2.5.1 La metodologia sperimentale 27
2.5.2 Risultati 29
2.5.3 Discussione dei risultati 33
2.6 APPROFONDIMENTO C2 (DEFINIZIONE DI MODELLI E METODI DI VALUTAZIONE NUMERICO-SPERIMENTALE DEI PONTI TERMICI NEI MATERIALI SUPERISOLANTI A SCALA DI COMPONENTE) 33
2.6.1 Metodologia 34
2.6.2 Risultati 41
2.7 APPROFONDIMENTO C3 (ANALISI DELL'INFLUENZA DEI PONTI TERMICI SUL BILANCIO ENERGETICO A SCALA DI EDIFICIO) 46
2.7.1 Metodologia 47
2.7.2 Risultati 50

3 CONCLUSIONI 54

3.1 ATTIVITÀ A 54
3.2 ATTIVITÀ B 54
3.3 ATTIVITÀ C 55

4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI 57

4.1 ATTIVITÀ A 57
4.2 ATTIVITÀ B 57
4.3 ATTIVITÀ C 58

5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI 60

6 APPENDICE 62

Sommario

Attività A

Attualmente, esiste una generale e internazionale preoccupazione a riguardo del crescente consumo di energia degli edifici. Il comportamento dell'utente ha un ruolo chiave nel determinare l'uso di energia finale degli edifici. Spesso, infatti, un'attenzione sproporzionata è diretta a migliorare l'efficienza energetica dei sistemi o ad aggiornare i sistemi installati, mentre ignora il fattore umano all'interno degli edifici stessi. Pertanto, la conoscenza dell'influenza del comportamento dell'utente risulta in presupposti ed assunzioni inappropriate e semplicistiche che portano ad aspettative di prestazioni energetiche inaccurate. La tradizionale priorità con la quale viene collocato il tema del comportamento dell'utente negli edifici, infatti, è risultata nelle larghe discrepanze delle simulazioni energetiche, diagnosi energetiche, ottimizzazione di sistemi, valutazione delle prestazioni.
La grande maggioranza degli studi esistenti sul tema del comportamento dell'utente fanno riferimento soprattutto alla prospettiva delle scienze sociali, mentre sono scarsi dal punto di vista di analisi più quantitative. La frazione di studi generati da una prospettiva matematica/ingegneristica risulta mancante di un consenso generale di un linguaggio comune, di un set-up delle tecniche di sperimentali e metodologie di modellazione. Come risultato, i modelli di comportamento esistenti sono affetti da incongruenze e contraddizioni.
Gli obiettivi dell'Annex 66 [1] sono di generare una piattaforma comune per la definizione standard di comportamento dell'utente e una metodologia quantitativa di simulazione del comportamento da essere utilizzata per modellare il comportamento dell'utente.

Il lavoro del Politecnico di Torino rispetto all'Annex 66 è strutturato in tre attività, come segue:

A.1 -Linee guida per diversi approcci di modellazione per il comportamento degli occupanti edifici adibiti a terziario

Finalità

Raccolta, esame e armonizzazione delle esperienze presenti nella letteratura internazionali riguardanti l'uso di metodi statistici e di modelli predittivi per la modellazione del comportamento dell'utente in ambito terziario.

Azione condotta

Le azioni comportamentali degli utenti (come ad esempio apertura/chiusura finestre, uso dell'illuminazione artificiale, o uso dell'impianto di riscaldamento) negli edifici per uffici hanno un impatto significativo nella prestazione energetica degli edifici. Questa attività di ricerca ha l'obiettivo di definire, classificare, descrivere, misurare, categorizzare le procedure appropriate per la sperimentazione in campo su diversi casi di studio. Di primaria importanza risulta quindi lo sviluppo di tecnologie affidabili per la modellazione delle azioni comportamentali e di procedure scientifiche rigorose di validazione dei modelli. L'applicazione a casi di studio reali risulta una attività chiave in questo lavoro di ricerca.

A. 2 – Approcci di studio sulla diversità di comportamento degli occupanti nel processo di sviluppo dei modelli

Finalità

L'obiettivo dell'attività è di capire come i diversi metodi di raggruppamento delle tipologie di occupanti (il clustering, che unisce tutti i dati per fare un modello, o combinando i dati proprio da ciascun occupante per fare un modello) influenzano la diversità delle previsioni di energia quando simulati.

Azione condotta

La definizione dei metodi di modellazione è un aspetto di primaria importanza che interessa la precisione dei profili di diversità di energia una volta attuata nella simulazione delle prestazioni dell'edificio. Per quanto riguarda la costruzione dei modelli di occupazione, i profili di diversità implementati nei programmi di simulazione energetica degli edifici, influenzano notevolmente l'uso di energia per l'illuminazione, i carichi delle apparecchiature elettroniche, l'utilizzo delle apparecchiature HVAC, i requisiti di aria fresca e i guadagni termici interni. Gli output previsti per questa attività di ricerca sono relativi alla descrizione delle azioni comportamentali degli utenti per la simulazione energetica dinamica, considerando un approccio sistematico di modellazione con diverse regole.

A. 3 – Verifica dei modelli comportamentali

Finalità

La finalità di questa attività è quella di capire come i diversi modelli comportamentali esistenti in letteratura si comportano in contesti differenti rispetto ai quali sono stati creati. Questa attività è importante soprattutto nella scelta dei modelli da implementare all'interno dei programmi di simulazione energetica-dinamica per la previsione dei consumi energetici degli edifici.

Azione condotta

La questione della validazione del modello è molto complessa e ci sono probabilmente molte opinioni su come verdicare i modelli come quanti sono i lavoratori del settore. L'attività si focalizza su un aspetto della validazione del modello: l'effettivo processo di confronto tra le previsioni dei modelli e le osservazioni sperimentali. Questo problema è legato alla capacità di riprodurre le azioni o la presenza degli utenti, confrontando i comportamenti osservati e quelli previsti. In particolare l'attività si avvalerà di due test: uno per il settore residenziale, considerando il comportamento legato ad apertura e chiusura delle finestre e uno per il settore terziario, considerando invece il comportamento legato all'illuminazione artificiale.

Attività B

L'Annex 59 "High Temperature Cooling & Low Temperature Heating In Buildings" è incentrato su metodologie di analisi e soluzioni tecniche per evitare o ridurre le perdite dovute alle differenze di temperatura nei diversi processi coinvolti nella climatizzazione di un ambiente chiuso. Precedenti progetti ECBCS come l'Annex 37 o l'Annex 49 hanno messo in evidenza come l'aumento dell'efficienza exergetica (o di secondo principio) venga ottenuto tramite una riduzione della differenza fra la temperatura dell'ambiente interno e quella del fluido operativo in uscita dalla centrale termica (tipicamente aria e/o acqua). Le perdite dovute a questa differenza di temperatura possono essere classificate come: (1) perdite per scambio di calore e di massa (umidità), (2) perdite per trasmissione di calore durante la circolazione del fluido operativo e (3) perdite nei terminali che scambiano calore (rilascio o assorbimento) con l'ambiente interno.
Pertanto, la riduzione della differenza di temperatura a cui viene scambiato il calore e la rimozione o riduzione degli scambi termici non strettamente necessari al condizionamento dell'ambiente interno sono la chiave per la realizzazione di sistemi HVAC più efficienti.
In particolare la ricerca condotta dal gruppo TEBE all'interno del progetto ha riguardato le seguenti attività:

- lo studio e lo sviluppo di soluzioni impiantistiche a moderata temperatura, quali "sistemi per riscaldamento a bassa temperatura (Low T heating systems) e sistemi per raffrescamento ad alta temperatura (High T cooling system), a servizio di edifici terziari e/o commerciali di grandi dimensioni;
- la definizione di una metodologia di analisi dei sistemi impiantistici (HVAC) di edifici terziari di grandi dimensioni ed alla raccolta dei sistemi impiantistici in uso a livello nazionale come riferimento;

- la definizione di un edificio di riferimento rappresentativo degli edifici per uffici a livello europeo per l'applicazione dei sistemi impiantistici studiati;
- la caratterizzazione dei carichi (moisture & cooling/heating loads) in vari climi e per diverse tipologie di edificio, dell'utilizzo di sorgenti e pozzi di calore per il riscaldamento a bassa.

Attività C

Le problematiche inerenti il retrofit energetico di edifici esistenti e lo sviluppo di nuove tecnologie di involucro per la realizzazione di edifici NZEB rappresentano temi di grande interesse ai fini dell'implementazioni delle politiche energetiche Europee a livello nazionale.
In questo contesto si inserisce la linea di ricerca C che, in particolare, intende:

- approfondire gli aspetti relativi allo sviluppo, utilizzo e caratterizzazione di materiali e sistemi innovativi per l'isolamento termico ed il miglioramento delle prestazioni energetiche dei componenti di involucro opaco, con specifico riferimento al retrofit energetico del parco edilizio esistente ed alle nuove costruzioni,
- approfondire gli aspetti relativi alle effettive prestazioni in opera di materiali superisolanti innovativi con specifico riferimento alla valutazione dei benefici energetici ottenibili.
- Ottimizzare (alla luce delle risultanze del punto precedente), dal punto di vita energetico, le tecniche di installazione e posa in opera dei materiali superisolanti

Nello specifico la ricerca si inserisce nel contesto del progetto internazionale IEA Annex 65 ECB "Long-Term Performance of Super-Insulating Materials in Building Components & Systems".
A tal fine si è proseguito con lo sviluppo dei modelli di simulazione numerica per investigare il comportamento di queste tecnologie, e si è proceduto all'applicazione di questi modelli per sviluppare analisi di sensibilità e valutazioni delle prestazioni energetiche sia a livello di componente che di edificio. Parallelamente, questi modelli sono stati utilizzati per ottimizzare la configurazione di pacchetti parietali utilizzanti materiali superisolanti.
Uno specifico focus è stato dedicato alla problematica dei ponti termici derivanti dall'accoppiamento e posa dei pannelli VIPs (Vacuum Insulation Panels) con il fine di mettere a punto una procedura di quantificazione del loro effetto, affidabile e di facile utilizzo per i progettisti. Tale metodologia consentirà di avere un quadro più accurato ed affidabile dei reali benefici ottenibili dall'uso dei sistemi superisolanti (gli effetti dei ponti termici sono spesso sottovalutati e le analisi costi/benefici sono spesso sviluppate sulla base di valori ottimistici della resistenza termica del materiale, derivate – tipicamente - da regole empiriche a partire dal valore misurato al centro del pannello e quindi non interessato dal ponte termico).
Parallelamente alle attività di simulazione è stata avviata una campagna di indagini sperimentali in laboratorio con il duplice obbiettivo di validare i modelli numerici sviluppati e per caratterizzare sperimentalmente le proprietà di questi materiali/sistemi. Questa attività, condotta all'interno dei gruppi di lavoro dell'Annex 65 costruirà una importante fonte di informazioni per poter predisporre le metodologie di certificazione delle prestazioni dei materiali superisolanti (attività di supporto allo sviluppo della normativa tecnica), una delle barriere all'ampia diffusione di tali tecnologie nel mercato edilizio.

1 Introduzione

1.1 Attività A

L'attività condotta dal gruppo di ricerca TEBE (www.polito.it/tebe) del Dipartimento Energia del Politecnico di Torino si è sviluppata all'interno delle linee di approfondimento dettate dal progetto EBC-Annex 66 [1] Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings" della International Energy Agency, iniziato con le riunioni preliminari nel 2014 e avrà termine nel 2017. Il gruppo TEBE ha partecipato in modo propositivo fin da subito allo sviluppo del progetto stesso. Alla luce degli importanti risultati ottenuti nello sviluppo del precedente progetto, il gruppo TEBE partecipa in prima linea all'interno del nuovo Annex, contribuendo intensamente ai diversi ST.

Questa attività, dunque, si basa sul presupposto che attraverso solo il passaggio della simulazione energetica dinamica da un approccio deterministico ad una probabilistico sarà possibile ottenere una previsione dei consumi energetici più vicina alla realtà. Questo approccio probabilistico è legato alla variabilità e alla imprevedibilità del comportamento dell'occupante durante l'intero ciclo di vita dell'edificio: cruciale diviene quindi tenere conto della presenza degli occupanti e delle loro interazioni con l'edificio e sistemi. In realtà, allo stato attuale, gli strumenti di simulazione energetica degli edifici riproducono spesso le dinamiche degli edifici usando equazioni numeriche che modellano comportamenti solo deterministici (completamente prevedibili e ripetibili). In tal modo, con il termine "simulazione del comportamento degli occupanti" si fa riferimento a una simulazione numerica che prevede la generazione di "schedules" fisse relative sia all'occupazione che al comportamento degli utenti. Queste schedules dunque rappresentano un comportamento immaginario di un occupante dell'edificio nel corso di una giornata tipica. Effettivamente, questa è una limitazione importante degli strumenti di simulazione energetica delle prestazioni energetiche degli edifici, mettendo in evidenza che i risultati ottenuti sono essenzialmente non realistici.

Nell'intenzione di ricondursi a tale ambito di studio, la metodologia proposta dalla presente linea di ricerca si sviluppa, dapprima, attraverso un approfondimento delle principali tecniche di modellazione del comportamento dell'utente.

L'approccio tradizionale ai programmi di simulazione dinamica, infatti, elabora previsioni dei consumi energetici in maniera del tutto deterministica. Da una parte fa uso di parametri di input standard e valutati per via deterministica: le condizioni interne ed esterne dell'edificio simulate durante la fase di dimensionamento del fabbisogno energetico degli edifici sono considerate stabili e corrispondenti alle condizioni medie, senza tenere però in considerazione possibili fluttuazioni annuali. D'altra parte, il comportamento dell'utente all'interno dell'edificio è replicato per mezzo di schedule standard (periodo di occupazione, livello d'illuminazione, numero di ricambi orari, set-point dei termostati, ecc). Nella realtà, tuttavia, l'interazione delle utenze con i sistemi di controllo e con l'involucro dell'edificio possono inficiare notevolmente la validità di tali assunzioni durante la vita utile dell'edificio. Pertanto, appare chiaro come la mancata sensibilità di tale metodologia "standard" alla naturale variabilità del comportamento dell'utente sia la fonte principale della discrepanza tra consumi energetici previsti e reali negli edifici.

Per questo motivo, nell'ambito del progetto internazionale IEA Annex 66 [1] i vuole concentrare sullo sviluppo e la proposta di un nuovo approccio metodologico in grado di comprendere il complesso sistema di relazioni tra stimoli comportamentali esterni e interni e quindi, in seguito, simulare il processo che conduce gli utenti all'interazione con il sistema edificio-impianto, al fine di ristabilire condizioni accettabili di qualità dell'ambiente interno.

Sulla base delle esperienze condotte e delle risultanze emerse nei precedenti studi, l'obiettivo dell'attività da sviluppare nell'ambito del presente contratto è pertanto dapprima la categorizzazione dei nuovi modelli matematici che rappresentano il comportamento dell'utente sviluppati sulla base dell'analisi statistica di dati ottenuti dal monitoraggio della reale interazione uomo-edificio. In secondo luogo, le attività si concentrano sui metodi raggruppare i dati riguardanti l'utenza per la costruzione dei modelli e la verifica se le diverse tecniche di raggruppamento hanno un effetto sulle previsioni dei consumi di energia. L'attività di ricerca si pone quindi anche l'obiettivo di ottenere un'indicazione dell'abilità dei modelli comportamentali

di replicare l'interazione dell'occupante con i sistemi di controllo e con l'involucro edilizio e le eventuali differenze d'influenza di diversi profili di operatività. Tale scopo è raggiunto mediante la definizione e l'analisi di differenti profili tipo di utenza domestica (pattern comportamentali) e la valutazione della loro influenza sul comfort termico e i consumi energetici in edifici residenziali.
Infine, il Politecnico di Torino è coinvolto nella definizione dei metodi di verifica e test dei diversi modelli comportamentali sviluppati ed esistenti in letteratura per gli edifici residenziali e edifici per uffici.
Gli output previsti dovrebbero risultare in una combinazione di metodi per misurare e ottenere i dati sulle interazioni degli utenti, nuovi modelli comportamentali, moduli software che descrivono e simulano il comportamento degli utenti, l'integrazione dei moduli software all'interno dei programmi di simulazione dinamica delle prestazioni energetiche degli edifici, e l'utilizzo di casi di studio per dimostrare l'applicazione dei modelli per risolvere i problemi reali di migliorare il progetto dell'edificio, il suo funzionamento di esercizio e il retrofit per ridurre i consumi energetici degli edifici.
I metodi di analisi, i modelli sviluppati e i risultati di questa linea di ricerca possono essere considerati, in una prospettiva a lungo miraggio, un punto di inizio per successivi sviluppi volti ad un perfezionamento nella previsione della performance energetica degli edifici. La messa in campo di una nuova metodologia e di nuovi strumenti predittivi, attraverso una più accurata descrizione dei profili comportamentali degli utenti, mira a rappresentare un passo importante verso la pre-standardizzazione della previsione dei consumi energetici degli edifici.

1.2 Attività B

L'attività oggetto di studio si sviluppa all'interno del progetto internazionale IEA Annex 59 "High Temperature Cooling & Low Temperature Heating In Buildings". Iniziata nel 2012, l'attività è prossima alla sua conclusione, prevista per ottobre 2015. L'Annex 59 è stato finalizzato alla definizione di una nuova metodologia di analisi dei sistemi impiantistici (HVAC) a moderata temperatura, a servizio di edifici terziari e/o commerciali di grandi dimensioni, quali ad esempio edifici per uffici.
La metodologia è stata sviluppata con l'obiettivo di colmare l'attuale inadeguatezza e carenza dei sistemi HVAC attraverso lo studio di configurazioni impiantistiche capaci di evitare compensazioni nei consumi energetici (per riscaldamento, raffrescamento, deumidificazione ed umidificazione) e perdite di trasmissione dovute ad inutili scambi termici. Pertanto il progetto ha riguardato principalmente lo studio di impianti per riscaldamento a bassa temperatura (Low T heating system) e per raffrescamento ad alta temperatura (High T cooling system), basati sulla riduzione della differenza di temperature nello scambio termico.

L'Annex è stato suddiviso in quattro Subtask, di seguito riportate:

- Subtask A: Principles and Methodology;
- Subtask B: Indoor temperature/ humidity field and Terminal;
- Subtask C: Outdoor air handling process;
- Subtask D: Total system analysis.

Nello specifico, l'attività del gruppo TEBE è stata condotta all'interno delle SubTask A e D.

Il subtask A è stato finalizzato alla individuazione di una metodologia di ricerca unificata e condivisa attraverso i seguenti obiettivi:

- Analisi critica sulle attuali metodologie di progetto degli impianti di climatizzazione evidenziando criticità e limiti;
- Individuare casi di studio tipologici da prendere a riferimento per le analisi condotte negli altri subtask;
- Studio sulla metodologia e sulla tecnologie dei componenti e processi negli impianti di climatizzazione, come scambiatori di calore, pome di calore, torri di raffreddamento ecc;

- Introdurre una nuova visione e metodologia per il progetto e l'analisi degli impianti di climatizzazione sulla base degli obiettivi posti nel progetto.

L'attività del gruppo TEBE all'interno della Subtask A dell'Annex 59 ha riguardato le operazioni per la definizione e calibrazione di un edificio di riferimento da adottare all'interno dell'Annex per la valutazione di nuove soluzioni impiantistiche. Lo scopo della creazione di tale modello è stato l'utilizzo dello stesso per la definizione di un sistema impiantistico di riferimento da mettere a confronto con soluzioni impiantistiche differenti.
Il Subtask D dell'Annex 59 è focalizzato sull'analisi dei sistemi nel loro insieme. L'obbiettivo primario dell'intero subtask è quello di ideare e/o analizzare dei sistemi di riscaldamento a bassa temperature e dei sistemi di raffrescamento ad alta temperature in un'ottica olistica, dalle sorgenti di energia sino ai terminali di impianto. In quest'ambito l'attività svolta dall'unità di ricerca del Politecnico di Torino è consistita nell'ideare e sviluppare un sistema solare termico innovativo basato su materiali a cambiamento di fase fluidizzati (mPCS).

Analizzati i profili di utenza e i risultati delle simulazioni teoriche, necessari al dimensionamento del sistema e dell'accumulo termico, si è proceduto con la realizzazione di un prototipo sperimentale a scala reale. Nei primi mesi di sperimentazione all'interno del presente substask sono state affinate le logiche di controllo e le strategie di gestione del dimostratore, risolvendo gli ultimi bug strumentali presenti all'interno dei software di controllo. Inoltre, è iniziata la fase sperimentale di monitoraggio e sono proseguite le analisi di laboratorio sulle proprietà termofisiche dei mPCS.

Questa cosa ha portato a completare prove di caratterizzazione del fluido mPCS (con particolare riferimento alle problematiche di creaming ed alla caratterizzazione della curva entalpia – temperatura del fluido utilizzato nel dimostratore) i cui risultati sono stati presentati in due articoli presentati ad una conferenza internazionale. Inoltre, si è proceduto con la caratterizzazione sperimentalmente del dimostratore: test per la costruzione di un reference case sulla base di una usuale soluzione glicole – acqua. Infine si sono prodotti 200 litri di mPCS con cui è stato rifornito il sistema per iniziare la sperimentazione dell'impianto con il nuovo fluido termovettore.

L'attività è divisa in alcune linee di approfondimento:

- B1. Sviluppo del concept dell'idea ed analisi dei principali sistemi di misura e controllo necessari al corretto funzionamento di un apparato sperimentale;
- B2. Prove di laboratorio necessarie a caratterizzare termofisicamente il materiale;
- B3. Costruzione di un dimostratore in scala reale e realizzazione di un monitoraggio in continuo. Verifica dei miglioramenti di efficienza attraverso il confronto con un sistema tradizionale funzionante ad acqua glicolata.

1.3 Attività C

Le attività di ricerca svolte nell'ambito dei materiali superisolanti per l'edilizia hanno riguardato diverse linee di approfondimento di seguito descritte:

- **C1.** Definizione di metodi sperimentali per la valutazione delle prestazioni termiche a scala di materiale.

Nel dettaglio sono stati eseguiti test di laboratorio finalizzati alla definizione di procedure per la misura della conduttività termica di VIPs (Vacuum Insulation Panels) attraverso il termoflussimetro con anello di guardia. I risultati ottenuti hanno dimostrato come le condizioni di prova possano influenzare la misura della conduttività termica, i grafici sotto riportati mostrano rispettivamente l'andamento del valore di conduttività termica al variare della temperatura media della prova e l'incertezza di misura al variare della differenza di temperatura generata tra le piastre.

- **C2.** Definizione di modelli e metodi di valutazione numerico-sperimentale dei ponti termici nei materiali superisolanti a scala di componente.

La valutazione dell'effetto dei ponti termici ha visto in questa prima fase l'analisi numerica dell'incidenza dei ponti termici in corrispondenza dei giunti costruttivi dei VIPs, in particolare è stato analizzato l'effetto di due diverse tipologie di giunto: quello dovuto all'accoppiamento di due pannelli VIPs e quello di tipo strutturale costituito ad esempio da listelli per il fissaggio meccanico.

- **C3.** Analisi dell'influenza dei ponti termici sul bilancio energetico a scala di edificio.

L'effetto dei ponti termici nei VIPs è stato successivamente valutato in termini di trasmittanza media di facciata per diverse tipologie di parete. A tal fine è stato sviluppato un modello di calcolo empirico derivato da interpolazioni polinomiali dei risultati ottenuti numericamente.

I modelli di calcolo sono successivamente stati impiegati per determinare l'influenza dei ponti termici sul bilancio energetico dell'edificio ed in particolar modo sul coefficiente di scambio termico per trasmissione. Dai risultati ottenuti è stato possibile evincere che l'influenza delle reali prestazioni in opera dei VIPs possono avere in determinati casi un effetto non trascurabile sul bilancio totale di energia dell'edificio.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Approfondimento A1

L'attività condotta dal gruppo di ricerca TEBE (www.polito.it/tebe) del Dipartimento Energia del Politecnico di Torino si è sviluppata all'interno delle linee di approfondimento dettate dal progetto ECBCS-Annex 66 "Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings" [1] della International Energy Agency, iniziato con le riunioni preliminari nell'aprile del 2014 e avrà termine nel 2017. Il gruppo TEBE ha partecipato in modo propositivo fin da subito allo sviluppo del progetto stesso, supportando attivamente le attività di preparazione del progetto.
In generale, lo scopo del progetto IEA-EBC Annex 66 è quello di creare una piattaforma di definizione del comportamento degli occupanti standard, stabilire una metodologia di simulazione quantitativa di modellazione del comportamento degli occupanti degli edifici, e capire l'influenza del comportamento degli occupanti sulla consumo energetico e l'ambiente interno degli edifici. A questo si affianca la raccolta e l'analisi critica di esperienze significative per una migliore comprensione del comportamento energetico reale degli edifici.
L'Annex 66 ha come principale obiettivo una migliore descrizione dei consumi energetici degli edifici attraverso una profonda analisi dell'influenza del comportamento dell'utente sulla qualità ambientale indoor e sulla prestazione energetica degli edifici.
Nell'intenzione di ricondursi a tale ambito di studio, la metodologia proposta dalla presente linea di ricerca si sviluppa, dapprima, attraverso un approfondimento dei principali fattori influenzanti, anche chiamati drivers, che letteralmente guidano, spingono, l'utente alla realizzazione di determinate azioni al fine di ristabilire la propria condizione di comfort all'interno degli ambienti in cui vivono e lavorano. Poiché le azioni dell'utente sono guidate dal complesso intreccio di "stimoli" interni ed esterni, queste sono difficilmente prevedibili secondo schemi e procedure di tipo standardizzato. L'approccio tradizionale ai programmi di simulazione dinamica, per contro, elabora previsioni dei consumi energetici in maniera del tutto deterministica. Da una parte, infatti, fa uso di parametri di input standard e valutati per via deterministica: le condizioni interne ed esterne dell'edificio simulate durante la fase di dimensionamento del fabbisogno energetico degli edifici sono considerate stabili e corrispondenti alle condizioni medie, senza tenere però in considerazione possibili fluttuazioni annuali. D'altra parte, il comportamento dell'utente all'interno dell'edificio è replicato per mezzo di schedule standard (periodo di occupazione, livello d'illuminazione, numero di ricambi orari, set-point dei termostati, ecc). Nella realtà, tuttavia, l'interazione delle utenze con i sistemi di controllo e con l'involucro dell'edificio possono inficiare notevolmente la validità di tali assunzioni durante la vita utile dell'edificio. Pertanto, appare chiaro come la mancata

sensibilità di tale metodologia “standard” alla naturale variabilità del comportamento dell’utente sia la fonte principale della discrepanza tra consumi energetici previsti e reali negli edifici.
Per questo motivo, nell’ambito del progetto internazionale IEA Annex 66 [1] ci vuole concentrare sullo sviluppo e la proposta di un nuovo approccio metodologico in grado di comprendere il complesso sistema di relazioni tra stimoli comportamentali esterni e interni e quindi, in seguito, simulare il processo che conduce gli utenti all’interazione con il sistema edificio-impianto, al fine di ristabilire condizioni accettabili di qualità dell’ambiente interno.
Per raggiungere gli obiettivi sopra illustrati, l´Annex 66 si divide in 4 Subtask:

- Subtask A: Occupant movement and presence models in buildings
- Subtask B: Occupant action models in residential buildings
- Subtask C: Occupant action models in office buildings
- Subtask D: Integration of occupant action models with BEM Programs

Lo studio condotto con la seguente attività rappresenta uno studio teorico ed empirico sull’incertezza della valutazione del consumo energetico considerando il comportamento degli occupanti in edifici residenziali. Lo scopo principale di questa ricerca è quello di proporre una metodologia per modellare il comportamento dell'utente con riferimento ai consumi energetici reali e applicata ad un caso di studio. La metodologia si delinea con uno spostamento verso una modellazione probabilistica del comportamento degli occupanti relativo al controllo dell’ambiente interno: l'obiettivo è quello di determinare modelli di comportamento degli utenti capaci di descrivere l'interazione con l’edificio e i sistemi. La procedura proposta viene quindi applicata a dei casi di studio: in particolare vengono definiti sia dei modelli di uso delle finestre (“window opening behaviour”) sia modelli di preferenze di set-point di riscaldamento in ambito residenziale.

Questa attività, dunque, si basa sul presupposto che attraverso solo il passaggio della simulazione energetica dinamica da un approccio deterministico ad una probabilistico sarà possibile ottenere una previsione dei consumi energetici più vicina alla realtà. Questo approccio probabilistico è legato alla variabilità e alla imprevedibilità del comportamento dell’occupante durante l’intero ciclo di vita dell’edificio: cruciale diviene quindi tenere conto della presenza degli occupanti e delle loro interazioni con l'edificio e sistemi. In realtà, allo stato attuale, gli strumenti di simulazione energetica degli edifici riproducono spesso le dinamiche degli edifici usando equazioni numeriche che modellano comportamenti solo deterministici (completamente prevedibili e ripetibili). In tal modo, con il termine "simulazione del comportamento degli occupanti" si fa riferimento a una simulazione numerica che prevede la generazione di "schedules” fisse relative sia all’occupazione che al comportamento degli utenti. Queste schedules dunque rappresentano un comportamento immaginario di un occupante dell’edificio nel corso di una giornata tipica. Effettivamente, questa è una limitazione importante degli strumenti di simulazione energetica delle prestazioni energetiche degli edifici, mettendo in evidenza che i risultati ottenuti sono essenzialmente non realistici.

L’attività del Politecnico di Torino legata alla modellazione statistica del comportamento dell’utente all’interno dell’Annex 66 [1] si sviluppa con tre studi:

1. **Linee guida per diversi approcci di modellazione per il comportamento degli occupanti edifici adibiti a terziario**

Le azioni comportamentali degli utenti (come ad esempio apertura/chiusura finestre, uso dell’illuminazione artificiale, o uso dell’impianto di riscaldamento) negli edifici per uffici hanno un impatto significativo nella prestazione energetica degli edifici. Questa attività di ricerca ha l’obiettivo di definire, classificare, descrivere, misurare, categorizzare le procedure appropriate per la sperimentazione in campo su diversi casi di studio. Di primaria importanza risulta quindi lo sviluppo di tecnologie affidabili per la modellazione

delle azioni comportamentali e di procedure scientifiche rigorose di validazione dei modelli. L'applicazione a casi di studio reali risulta una attività chiave in questo lavoro di ricerca.

2. **Approcci di studio sulla diversità di comportamento degli occupanti nel processo di sviluppo dei modelli.**

La definizione dei metodi di modellazione è un aspetto di primaria importanza che interessa la precisione dei profili di diversità di energia una volta attuata nella simulazione delle prestazioni dell'edificio. Per quanto riguarda la costruzione dei modelli di occupazione, i profili di diversità implementati nei programmi di simulazione energetica degli edifici, influenzano notevolmente l'uso di energia per l'illuminazione, i carichi delle apparecchiature elettroniche, l'utilizzo delle apparecchiature HVAC, i requisiti di aria fresca e i guadagni termici interni. Gli output previsti per questa attività di ricerca sono relativi alla descrizione delle azioni comportamentali degli utenti per la simulazione energetica dinamica, considerando un approccio sistematico di modellazione con diverse regole.

3. **Verifica dei modelli comportamentali**

La questione della validazione del modello è molto complessa e ci sono probabilmente molte opinioni su come verdicare i modelli come quanti sono i lavoratori del settore. L'attività si focalizza su un aspetto della validazione del modello: l'effettivo processo di confronto tra le previsioni dei modelli e le osservazioni sperimentali. Questo problema è legato alla capacità di riprodurre le azioni o la presenza degli utenti, confrontando i comportamenti osservati e quelli previsti. In particolare l'attività si avvalerà di due test: uno per il settore residenziale, considerando il comportamento legato ad apertura e chiusura delle finestre e uno per il settore terziario, considerando invece il comportamento legato all'illuminazione artificiale.

A complemento di tali attività si può aggiungere il contributo che il Politecnico di Torino dà al ST-D dell'Annex 66 [1], riguardante l'implementazione all'inetrno dei programmi di simulazione energetica dinamica. È essenziale infatti, integrare i modelli comportamentali degli occupanti nei programmi di simulazione energetica dinamica maggiormente utilizzati per pesare l'impatto dei diversi modelli comportamentali degli utenti nella prestazione energetica degli edifici. Questa attività di ricerca si pone l'obiettivo di sviluppare e integrare i software attualmente disponibili come Energy Plus, DeST, TRNSYS e IDA ICE. Moduli software di azioni comportamentali sono quindi i risultati attesi da questo studio, insieme a guide per gli sviluppatori di software.

2.1.1 Linee guida per diversi approcci di modellazione per il comportamento degli occupanti edifici adibiti a terziario

L'attività di revisione critica e categorizzazione delle diverse tecniche di modellazione degli utenti negli edifici residenziali si sviluppa attraverso i seguenti studi:

- Introduzione di ognuno dei concetti di modellazione occupante con i relativi esempi o nomi di ogni tipo di modellazione della letteratura
- Definizione di esempi illustrativi per ogni categoria emersa
- Illustrazione dei contrasti della loro accuratezza predittiva
- Discussione dei vantaggi e dei limiti per lo sviluppo e la realizzazione di ogni tipo di modello
- Sviluppo raccomandazioni per il lavoro futuro.

L'attività si è quindi delineata nella descrizione delle tipologie di modellazione categorizzando le possibili tecniche dapprima in due macro categorie: modelli "Gray-to-Whitebox models" e "Blackbox models".
La differenza tra le due principali tecniche è che gli occupanti nei modelli Gray-to-Whitebox vengono descritti essenzialmente sulla base di leggi fisiche e non sempre fanno affidamento su modelli empirici.
Appartengono a questa categoria di modelli ad esempio il modello di comfort di Fanger, il cui indice PMV utiizza il metodo del bilancio di calore attraverso il corpo umano. Un altro esempio di questo tipo di modelli è l'indice di Reinhart dell'abbagliamento: questo indice infatti si calcola su computazioni geometriche tra la fonte di abbagliamento e l'occupante.

I modelli Blackbox (chiamati anche data-driven) invece sono interessati nelle relazioni di input-output per spiegare il comportamento. questi tipi di modelli sono sviluppati attraverso campagne di monitoraggio, e si basano dunque su dati empirici e non sulla descrizione fisica del corpo umano. Ad esempio, il modello di utilizzo dell'illuminazione artificiale di Reinhart si basa sul livello di illuminamento sul piano di lavoro per spiegare il comportamento di accensione delle luci.
I modelli blackbox, pero, possono essere ancora suddivisi in due grandi sotto-categorie: modelli che si basano sul comfort per definire le azioni degli utenti e modelli che invece sono indipendenti dal comfort. La differenza fondamentale tra le due tipologie di modelli è che la prima categoria contiene tutti quei modelli di comportamento che sono guidata dalla necessità di migliorare o ripristinare le condizioni di comfort: per esempio aprire / chiudere la finestra o accendere la luce se il livello di illuminazione nella stanza non è sufficiente per svolgere il proprio compito visivo. La seconda categoria invece contiene quei modelli di comportamento che non sono guidati nelle loro azioni dal desiderio di ottenere le condizioni di benessere: ad esempio spegnere la luce quando si esce dall'ufficio o quei modelli che esprimono l'utilizzo delle apparecchiature elettriche. La figura seguente (Figura 1) riporta la categorizzazione effettuata per discriminare i modelli di comportamento negli edifici per uffici.

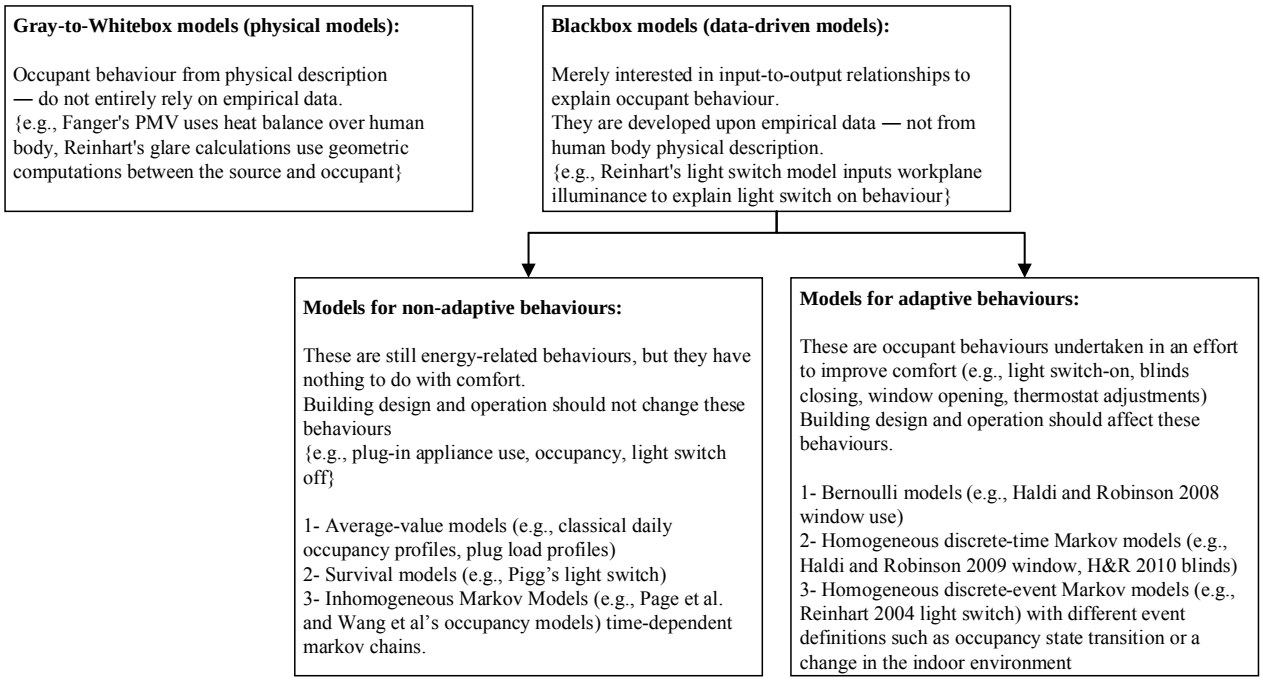

Figura 1. Categorizzazione dei modelli di comportamento in edifici per uffici

La finalità di questa attività è dunque lo studio e l'individuazione delle relazioni tra comportamento degli occupanti degli edifici per uffici, altri fattori influenzanti e i consumi energetici degli edifici con particolare riferimento agli aspetti di apertura e chiusura delle finestre, accensioni e spegnimenti della luce.

Da diversi studi hanno dimostrato che le azioni degli occupanti per l'illuminazione e la ventilazione naturale sono strettamente collegate al fatto che le persone stanno entrando o lasciando i luoghi di lavoro, il tempo di presenza (arrivo, permanenza e partenza dal luogo di lavoro) è un importante fattore comportamentale di influenza del comportamento da includere nelle analisi oltre le variabili ambientali indoor e outdoor.

Modelli comportamentali diversi legati alle preferenze degli occupanti di illuminazione artificiale e di ventilazione naturale sono ottenuti dai dati raccolti nel corso di campagne di monitoraggio in un edificio per uffici. E 'stata valutata la probabilità che un'azione (interruttore acceso o spento, finestra aperta/chiusa) può verificarsi per diversi modelli comportamentali (utenti attivi e passivi), definiti sulla base del numero di azioni sui periodi di lavoro. Dai modelli ottenuti con le analisi statistiche è emerso che il comportamento degli utenti è influenzato da molti parametri, ottenendo un risultato che rappresenta un passo in avanti rispetto agli studi precedenti (figura 2). Infatti, anche tenendo conto del modello di

accensione della luce artificiale più semplificato, due nuovi parametri ambientali vengono usati per ottenere la probabilità di accadimento di un'azione: temperatura interna ed altezza solare. Si è capito che gli utenti sono più propensi ad accendere le luci che a spegnerle. Questa situazione sottolinea quanto sia importante per informare ed educare le persone in relazione a questo argomento.

I risultati ottenuti dagli studi effettuati dimostrano che la presenza di utenti attivi all'interno degli uffici non implica un minore consumo energetico: la loro possibilità di spegnere la luce è superiore, ma anche la possibilità di accenderla. I prossimi passi saranno l'implementazione del modello in un software energetico dinamico per verificare quantitativamente l'impatto del comportamento sui consumi di energia.

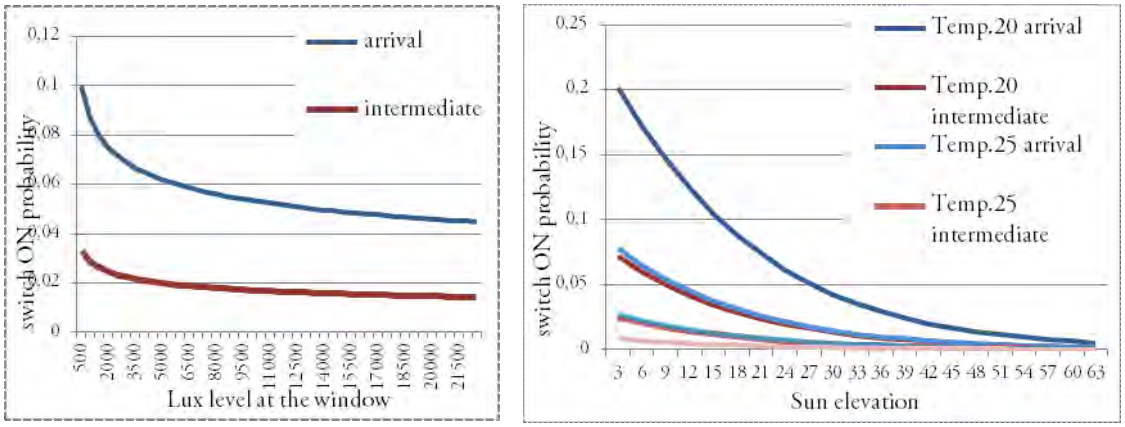

Figura 2. Curve di probabilità di accensione della luce artificiale legate a diversi fattori influenzanti

2.1.2 Approcci di studio sulla diversità di comportamento degli occupanti nel processo di sviluppo dei modelli.

Lo scopo di questa attività è lo studio e l'individuazione delle relazioni tra comportamento dell'utente e tipologie di clusterizzazione durante lo sviluppo dei modelli comportamentali. In particolare, il fine ultimo di questo studio è la comprensione di come i diversi metodi di raggruppamento delle tipologie di occupanti (il clustering, che unisce tutti i dati per fare un modello, o combinando i dati proprio da ciascun occupante per fare un modello) influenzano la diversità delle previsioni di energia quando simulati.
La definizione dei metodi di modellazione è un aspetto di primaria importanza che interessa la precisione dei profili di diversità degli occupanti e il loro relativo effetto sulla previsione dei consumi energetici una volta implementati nei programmi di simulazione energetica delle prestazioni degli edifici.
Per quanto riguarda la costruzione dei modelli di occupazione, i profili di diversità degli utenti implementati nei software di simulazione energetica dinamica influenzano notevolmente l'illuminazione, l'energia dovuta all'uso delle apparecchiature elettroniche, l'utilizzo delle apparecchiature HVAC, i requisiti di aria fresca e di guadagni termici interni. Risulta dunque necessario e di fondamentale importanza sviluppare le metodologie appropriate per descrivere e riprodurre l'intricata rete responsabile delle interazioni uomo-edificio- a seconda del campo di applicazione del modello e l'applicazione. Quando si tratta di grandi flussi di dati, come ad esempio il rilevamento dei profili di occupazione in molti spazi in diversi edifici per uffici, l'analisi statistica dei pattern di occupazione ricorsiva può portare ad una semplificazione eccessiva, cioè ad appiattire i profili di diversità di più profili attraverso un "utente tipo dell'ufficio". Al contrario, l'estrapolazione di gruppi di stili di lavoro tipici relativi agli uffici, sulla base dei quali sub sequenzialmente si possono generalizzare modelli statistici di occupazione, risulta significativa e una potente tecnica di analisi, che consentirà una migliore comprensione del consumo di energia negli edifici Esempi di questa metodologia di analisi è la tecnica di data-mining statistico: ad esempio in due fasi questa tecnica è stata applicata ai pattern di uso della finestra e ai profili di occupazione con uno stesso set di dati (vedi D'Oca et Hong [4]). Tuttavia, questo studio descrive solo la derivazione empirica avanzata degli orari di occupazione

e dei modelli di apertura della finestra per i diversi profili di lavoro. Ulteriori studi sono necessari per testare (valutare, validare) l'attuazione di tali profili di diversità in una simulazione energetica delle prestazioni degli edifici.
Un'altra domanda a cui questo studio cerca di rispondere riguarda i comportamenti in sé degli utenti, ad esempio se gli occupanti attivi sono "attivi" costantemente rispetto a tutti i sistemi adattivi (schermature, finestre, luci, ecc) o sono attivi riguardo ad un solo sistema all'interno dell'ufficio. Ovviamente, la risposta non è univoca trattandosi di un comportamento molto più complicato rispetto a queste due domande.
La figura 3 mostra la probabilità di accendere la luce e chiudere le schermature con la stessa quantità di illuminamento sul piano di lavoro.

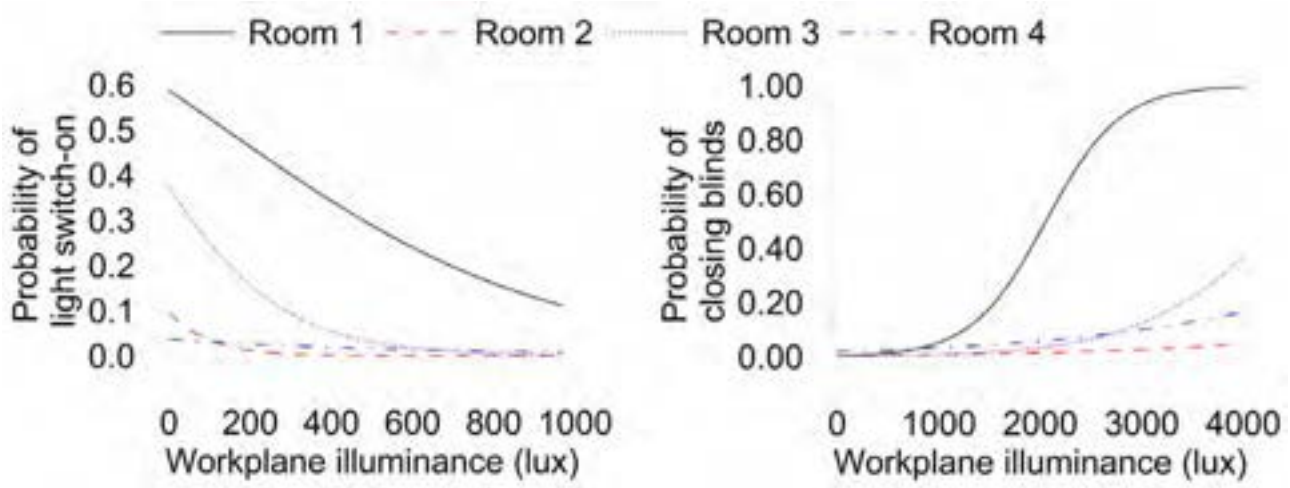

Figura 3. Curve di probabilità di accensione della luce artificiale legate al livello di illuminamento

Un altro esempio di questa interazione tra comportamenti viene fornito dall'uso del termostato e delle finestre, questa volta in campo residenziale.
Una campagna di monitoraggio campo delle condizioni climatiche interne ed esterne e delle azioni di controllo degli e occupanti (le aperture delle finestre e degli aggiustamenti del termostato) è stato eseguito in quindici abitazioni con ventilazione naturale nelle vicinanze di Copenaghen. I dati raccolti durante le misurazioni sono stati ottenuti sia in soggiorno e camera da letto in ogni abitazione (con acquisizioni ogni dieci minuti di temperatura esterna ed interna [° C], di umidità relativa interna ed esterna [%], concentrazione di CO2 interna [ppm], illuminamento interno [lx], radiazione solare globale [W/m2], velocità del vento [m/s] e il numero di ore solari al giorno: inoltre la posizione della finestra [apri / chiudi] e riscaldamento set-point su valvole termostatiche [° C]) sono stati statisticamente trattati.
Da tali dati emerge come il numero totale di apertura della finestra varia enormemente da dimora a dimora, fino ad abitazioni in cui la finestra è stata aperta fino a 718 volte durante l'intero periodo di rilevamento di monitoraggio. Inoltre, i dati hanno mostrato grande disparità tra le impostazioni del set point di riscaldamento individuale. Le abitazioni sono state raggruppate, dopo la frequenza delle manipolazioni dei termostati dei loro abitanti, e nominate come tipo di utente attivi, passivi e nella media.
Lo studio ha ulteriormente focalizzato l'attenzione sulla determinazione di variabili che avevano un'influenza su apertura e chiusura di una finestra o di alzare o abbassare il termostato, per ciascuno degli utenti attivi medi-passivi.
Due principali risultati sono emersi da questo studio
a) la stessa abitazione non è clusterizzabile entro gli stessi modelli comportamentali, ciò significa che i tipi di utenti che sono attivi-medi-passivi per il termostato non corrispondono necessariamente allo stesso livello di interattività con le aperture delle finestre.
b) la probabilità di alzare/abbassare il termostato e l'apertura/chiusura della finestra è stata dedotta per tre modelli comportamentali separati, per cui le variabili che influenzano il controllo azioni emerse hanno diverso impatto sui tre tipi di utente.

Come osservazione generale, gli occupanti non sono sempre gli utenti attivi-passivi di tutti i sistemi adattativi (finestre, termostato, ecc), ma è generalmente più complicato di così. Le differenze di set-point del termostato e il funzionamento delle finestre possono essere interpretati come risultato della variazione di sensibilità occupanti alle variabili esterne e interne che influenzano e regolano il loro comportamento adattivo [7].
I risultati possono essere visti come un importante conferma della rilevanza della percezione soggettiva umana della qualità dell'aria interna, il clima termico e le preferenze di comfort, che colpisce le previsioni di rendimento energetico dell'edificio quando gli utenti sono autorizzati a controllare l'ambiente interno.

2.1.3 Verifica dei modelli comportamentali

Lo sviluppo di soluzioni efficaci per la previsione e l'ottimizzazione del rendimento energetico e ambientale degli edifici è in crescita. L'utilizzo di modelli stocastici per la simulazione delle interazioni occupanti con l'ambiente costruito ha notevolmente colpito negli ultimi anni l'approccio di considerare il comportamento degli occupanti per la previsione della costruzione di prestazioni energetiche. La questione della validazione del modello è molto complesso e ci sono probabilmente molte opinioni sul tema quanti sono i lavoratori del settore. L'obiettivo di questa attività sarà su un aspetto specifico della validazione dei modelli comportamentali: l'effettivo processo di confronto tra le previsioni dei modelli alle osservazioni sperimentali. Questo problema è legato alla capacità di riprodurre azioni o sistemi stati degli utenti, confrontando i comportamenti osservati e quelli previsti (ad esempio le aperture delle finestre reali e simulate sia statisticamente che tramite software dinamici).
Il processo di validazione è principalmente un modo di misurare le prestazioni predittive di un modello statistico.
Un modo per misurare la capacità predittiva del modello è quello di testare su un insieme di dati non utilizzati nella generazione del modello. L'idea principale dietro la validazione è di avere due campioni, uno utilizzato come "campione di addestramento", per generare l'algoritmo, e l'altro campione, il "campione di validazione", viene utilizzata per stimare la precisione dell'algoritmo.
In generale, i modelli statistici pubblicati di comportamento dell'occupante non vengono validati. In realtà, fino ad ora, solo pochi documenti sulla validazione dei modelli di comportamento sono pubblicati in letteratura, per quanto riguarda rispettivamente gli edifici per uffici e edifici residenziali [4]. Nel 2009, Haldi e Robinson [2] hanno proposto una procedura di convalida incrociata per eseguire la valutazione del potere predittivo dei modelli di comportamento di apertura finestra sviluppate per gli edifici per uffici. Applicando i criteri di convalida proposti, nel 2011, Schweiker et al. [3] testato l'accuratezza dei modelli di comportamento di apertura della finestra utilizzando diversi set di dati in un modo in doppio cieco. Anche se questi due documenti rappresentano una tappa importante sulla strada di valutare l'accuratezza predittiva dei modelli stocastici di interazione occupanti con l'ambiente costruito (in particolare con le finestre), vi è la necessità di approfondire i lavori di ricerca.
Un altro modo per verificare l'accuratezza predittiva di un modello è attraverso la simulazione dinamica. La verifica si basa quindi sul confronto tra valori reali (di variabili ambientali interni o consumi energetici) misurati in edifici ei valori che si ottengono mediante l'attuazione di modelli testati in software di simulazione dinamica.
L'ultima attività della ricerca è legata al test di alcuni modelli statistici definiti per garantire la loro efficacia. In questa parte della ricerca, i dati di un campione analogo di abitazioni dove gli stessi parametri interni ed esterni sono stati raccolti, vengono utilizzati per validare i modelli di comportamento. La validazione viene eseguita confrontando le previsioni di apertura e chiusura delle finestre con lo stato attuale delle finestre registrato nelle abitazioni. Dal momento in cui in letteratura sono presenti alcuni modelli logistici legati all'uso delle finestre, in funzione della temperatura interna, temperatura esterna o entrambe, anche questi modelli vengono verificati con questa procedura di validazione.
Nel complesso, l'attività condotta dal gruppo TEBE nell'ambito del ST-C dell'Annex 66 [1] sottolinea l'importanza di descrivere il comportamento dell'individuo legato all'interazione con edifici e sistemi in modo più accurato e realistico, al fine di comprendere le differenze nei consumi di energia reali degli edifici. Inoltre, nonostante l'applicazione descritta in questa tesi sia limitata per la maggior parte delle analisi

all'uso delle finestre, il metodo presentato può essere applicato anche ad altri tipi di azioni comportamentali.

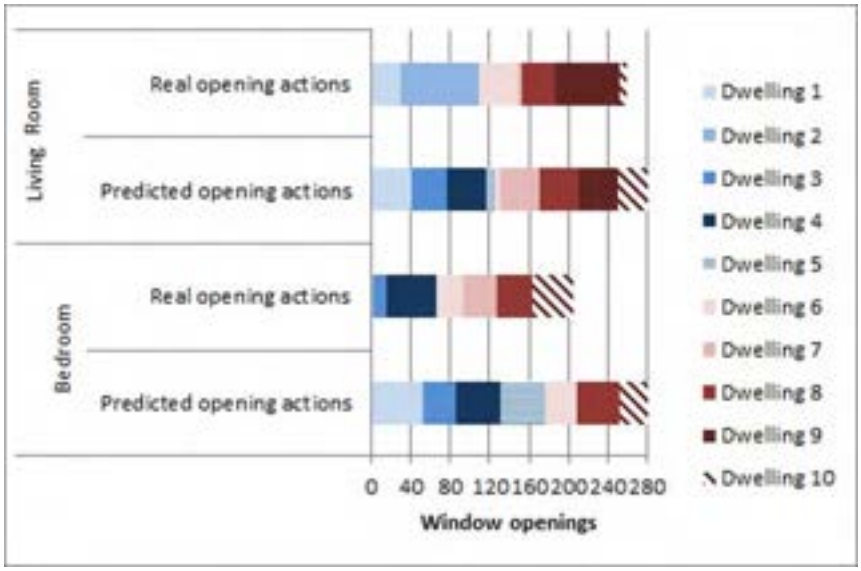

Figura 4. Esempio di validazione di modelli di comportamento legato alle azioni sulle finestre.

La figura 4 mostra un esempio di test su modelli comportamentali legati all'uso delle finestre. In questo caso i dati reali sulle aperture/chiusure delle finestre vengono comparati con quelle previste statisticamente usando un modello di comportamento sviluppato in letteratura.

2.1.4 Implementazione all'interno di software di simulazione

Un altro campo di applicazione dello studio è stato quello di indagare sulle implicazioni delle diverse ipotesi riguardo il funzionamento della finestra in un edifici per uffici (figura 4), ventilato sia meccanicamente che naturalmente, posto in diverse località, nello specifico Torino e Atene, con l'obiettivo di valutare l'influenza del clima sui consumi energetici previsti. A questo fine è stata sviluppata una simulazione numerica dinamica, che prende in considerazione la possibilità che l'azione di apertura/chiusura della finestra si svolga attraverso parametri di input statistici, al fine di simulare le prestazioni energetiche dell'edificio.

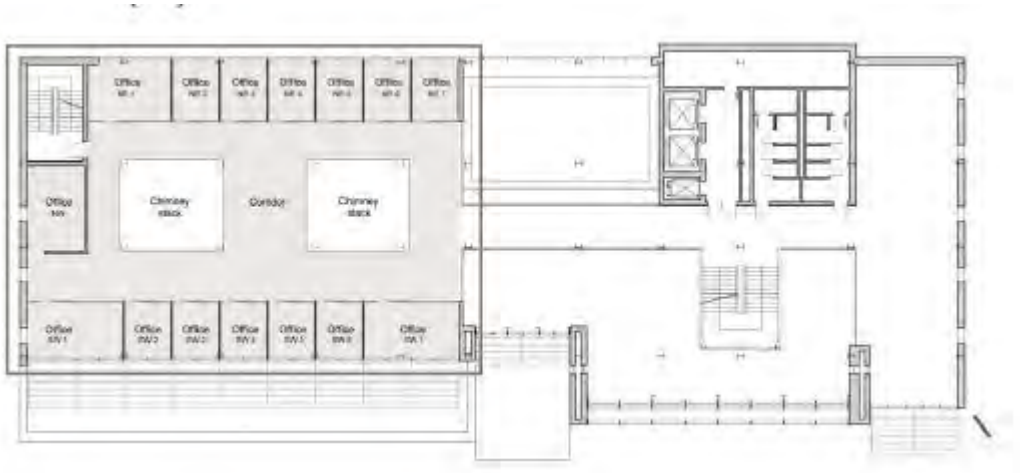

Figura 4. Pianta del piano tipo dell'edificio preso come riferimento per lo studio condotto

L'implementazione dei modelli nel programma di simulazione ha portato ad evidenziare uno scostamento tra i valori ottenuti con l'approccio "deterministico" e " probabilistico" (figura 4).

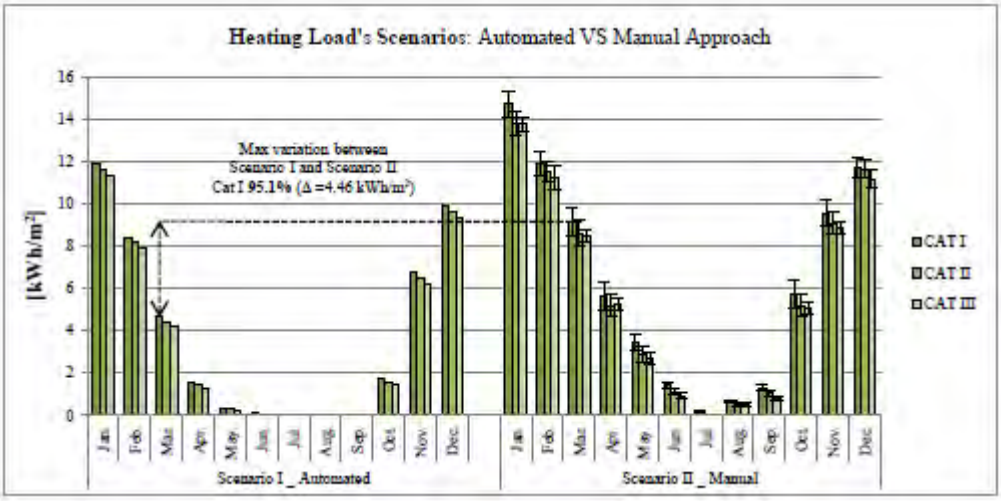

Figura 5. Fabbisogni energetici per riscaldamento dell'edificio simulato con le schedule deterministiche e probabilistiche.

2.2 Approfondimento B1 (il concept dell'idea)

L'attività del gruppo TEBE all'interno del Subtask A è stata finalizzata alla creazione di un modello di edificio di riferimento da impiegare per l'utilizzo di nuove soluzioni impiantistiche da parte dei partner capofila dell'Annex 59. La definizione del modello di riferimento è stata sviluppata con i partners belgi dell'Università di Liegi.
L'edificio scelto è un edificio ad uso uffici di medie dimensioni, definito a partire dal "commercial reference large office building" del Dipartimento di Energia degli Stati Uniti. L'edificio è stato tuttavia modificato in base ad abitudini più tipicamente europee, sia di progettazione che di utilizzo degli edifici per uffici.
In particolare si tratta di un edificio per uffici di 10 p.f.t., con una superficie lorda di 16600m^2. L'involucro edilizio è stato caratterizzato da una muratura in calcestruzzo, isolata con cappotto esterno, una copertura piana isolata e serramenti vetrocamera. L'utilizzo dell'edificio è stata definito nel rispetto dei profili e degli apporti standard indicati nella norma europea EN 15232.
In collaborazione con i partner belgi, il modello energetico dell'edificio è stato creato attraverso diversi programmi di simulazione dinamica quali EES, EnergyPlus e Trnsys. Il modello di riferimento creato dal gruppo TEBE è stato sviluppato con il programma di simulazione termoenergetica di origine statunitense, EnergyPlus. Il modello dell'edificio è stato inoltre sottoposto ad un processo di validazione attraverso il confronto dei modelli termoenergetici creati con diversi programmi al fine di valutare le differenze tra i vari software. Nello specifico il processo ha riguardato il confronto del modello attraverso due parametri di riferimento (temperatura ambiente interno [°C] e fabbisogno ambientale per riscaldamento e riscaldamento [kWh/m^2]) in diverse simulazioni con le medesimi condizioni al contorno (e.g. condizioni quasi-stazionarie, simulazione con sola radiazione solare etc).
Il fabbisogno di energia per riscaldamento e per raffrescamento sono pari rispettivamente a 45,5 kWh/m^2 e 42,9 kWh/m^2. Inoltre, al fine di simulare una situazione più realistica, sono stati definiti, per ciascun zona termica, dei volumi di ricambio orari di infiltrazione ed è stato ricalcolato il fabbisogno di energia per riscaldamento e raffrescamento dell'edificio, pari rispettivamente a 53,4 kWh/m^2 e 42,2 kWh/m^2.

Nel Subtask D il gruppo TEBE si è soffermato sull'approfondimento di soluzioni tecnologiche e progettuali di un particolare sistema impiantistico: i sistemi solari termici. Si è cercato di valutare delle soluzioni in grado di abbassare le temperature di questo sistema e di ridurre il numero di salti termici presenti tra i vari componenti del sistema.

Sebbene l'utilizzo di livelli termici non elevati e la sostanziale riduzione delle temperature negli impianti di riscaldamento abbia migliorato i rendimenti di questi ultimi, non è possibile affermare la stessa cosa per gli accumuli termici. Infatti, sebbene anche in questo caso le temperature inferiori ridurrebbero le dispersioni, esse comporterebbero un drastico aumento delle dimensioni dei serbatoi di accumulo. Poiché, in generale, l'accumulo avviene tramite il solo calore sensibile, la riduzione delle temperature sarebbe la causa di densità energetiche meno elevate e pertanto occorrerebbe incrementare il volume al fine di immagazzinare la stessa quantità di energia. Per questo motivo, spesse volte, impianti con salti termici ridotti risultano comunque combinati con accumuli a temperatura più elevata.
Il grande incremento del ricorso a fonti energetiche rinnovabili, quali ad esempio il solare termico, ha fatto assumere agli accumuli termici un'importanza sempre maggiore. Infatti, è stato necessario sopperire al problema della scarsa contemporaneità tra domanda ed offerta di energia tramite sistemi in grado di accumulare calore in un momento di disponibilità e di rilasciarlo in un secondo momento, quando richiesto dall'utenza. Questo principio è stato oggetto di svariati studi negli anni recenti e ha portato anche il nostro gruppo di ricerca ad approfondire l'argomento, ad esempio cercando di tracciare i profili di carico e scarico dei serbatoi di accumulo (su scala giornaliera o stagionale), mediante una serie di simulazioni energetiche di un'utenza residenziale tipo (alcuni risultati sono riportati in Figura B-1).
Per i motivi sopra elencati, la possibilità di accumulare energia a bassa temperatura, diventa quindi una scommessa sempre più importante. La riduzione dei salti termici tra le diverse componenti di un impianto termico e delle differenze di temperatura con l'esterno può essere il motivo di un elevato risparmio energetico. Tuttavia questa cosa non può essere fatta a discapito delle dimensioni dei volumi di accumulo, che devono comunque rimanere contenuti e rispondenti alle necessità progettuali. Per questo motivo, recentemente sono stati studiati ed introdotti in letteratura una serie di accumuli a calore latente (in generale indicati con l'acronimo LHTES Latent Heat Thermal Energy Storage) [3], che riescono a contenere al loro interno grandi quantità/densità energetiche senza innalzare eccessivamente la propria temperatura.

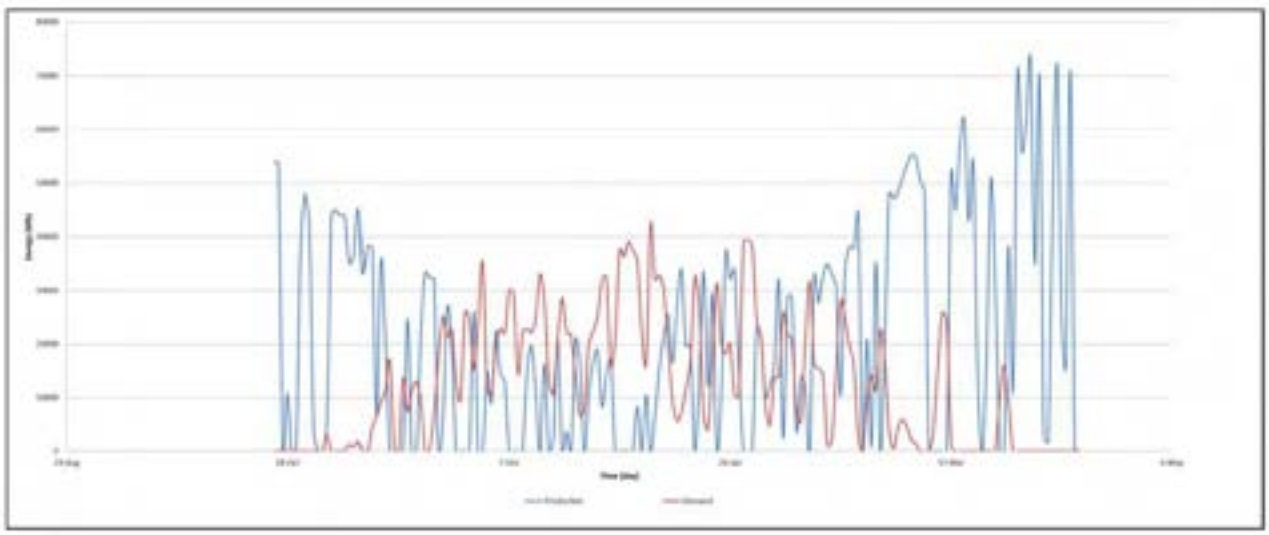

Figura B- 1. Confronto, per un'utenza residenziale standard, tra l'energia richiesta giornalmente per il riscaldamento (in rosso) e l'energia prodotta giornalmente da un sistema solare termico (in blu) durante la stagione di riscaldamento

In particolare risulta di notevole interesse per le ricerche in questione l'utilizzo di materiali a cambiamento di fase (PCM: Phase Change Material) all'interno degli accumuli termici [1-4]. I PCM sono delle sostanze chimiche di diversa natura (paraffine, sostanze inorganiche, sali idrati, miscele eutettiche...) in grado di cambiare di fase alle più svariate temperature. Al giorno d'oggi è possibile produrre materiali a cambiamento di fase che temperature di fusione/solidificazione che coprono la maggior parte dei range di temperatura di interesse pratico. Un particolare interesse è stato rivolto ai materiali a cambiamento di fase fluidizzati (slurry PCM o PCS): materiali a cambiamento di fase sospesi o micro-incapsulati all'interno di un

fluido (nella maggior parte dei casi acqua) che rimane sempre liquido, indipendentemente dallo stato di aggregazione del PCM [2]. Questi materiali, oltre ad avere migliore diffusività termica, presentano il vantaggio di potere essere utilizzati per il trasporto attivo di calore a temperatura costante. Questa caratteristica permette di inserirli all'interno di tubazioni in impianti che devono trasportare energia termica da un posto all'altro.
Nello specifico, è stata approfondito lo studio riguardante l'inserimento di PCS all'interno di sistemi solari termici. La letteratura scientifica in materia presenta diversi studi al riguardo, nei quali PCM e PCS sono presenti all'interno dei pannelli solari stessi [12], degli accumuli termici [10] o di specifici nodi di accumulo latente [11]. L'obiettivo di queste soluzioni è proprio quello di cercare di ridurre il livello termico di uno specifico componente per garantire rendimenti maggiori. La nostra ricerca ha evidenziato che l'utilizzo di PCS fluidizzati direttamente come fluido termovettore in sostituzione della tradizionale acqua glicolata, potrebbe essere un modo per garantire la presenza del materiale in contemporanea in tutti questi componenti e incrementare notevolmente l'efficienza del sistema riducendo le dispersioni ed il numero di salti termici tra i sotto-sistemi. In Figura 2 vengono presentate due possibili soluzioni tecnologiche di sistemi solari termici a materiali a cambiamento di fase.
Le proprietà termofisiche del nuovo fluido termovettore a mPCS saranno funzione del materiale scelto e della concentrazione dello stesso. Una ricerca di letteratura ha portato a comprendere che i PCM micro-incapsulati sono quelli che garantiscono una migliore stabilità e durabilità. Sul mercato sono presenti numerosi materiali di questo tipo ed il range di temperature coperto da questi PCM risulta piuttosto vasto. Partendo dal presupposto che la soluzione ottimale per la ricerca in questione è quella che minimizza il livello termico e le differenze di temperatura, si è cercato di far coincidere la temperatura di cambiamento di fase con quella cui è necessario far funzionare il sistema. Nella fattispecie, si è supposto di abbinare il sistema solare con un impianto di riscaldamento con pannelli radianti termici come terminali (range di funzionamento 30-35°C). Per questo motivo la temperatura ottimale risulta essere quella leggermente superiore a questo range, in modo da garantire lo scambio termico in tutte le occasione. Il materiale che meglio aderisce a queste disposizioni è l'n-eicosano micro-incapsulato, il quale transisce di fase tra i 38 ed i 40°C. Per realizzare lo slurry PCS si dovrà disperdere le microcapsule in un fluido termovettore che si è supposto essere acqua glicolata. La concentrazione relativa dei due componenti della sospensione sarà valutata in un secondo momento per ottimizzare lo scambio termico e minimizzare la viscosità del fluido.

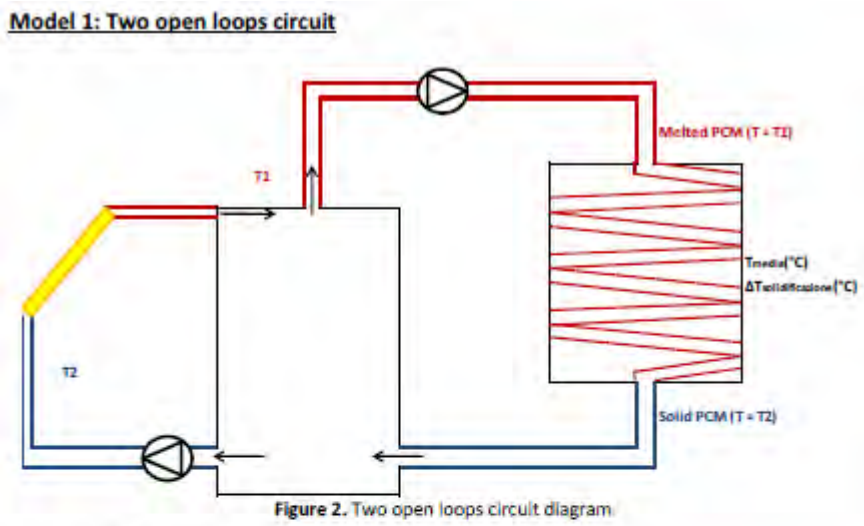

Figura B- 2. Due possibili configurazioni tecnologiche del sistema solare innovativo. Il modello 1 rappresenta quello energeticamente più efficiente, ma anche più difficile da realizzare tecnologicamente.

In una prima fase sono stati ricercati i benefici di una tecnologia solare termica alimentata a mPCS, trovando che la riduzione del livello termico del fluido termovettore comporta sia una riduzione delle dispersioni verso l'esterno di alcuni componenti (tra cui il pannello solare stesso); sia l'aumento del numero di ore utili per produrre energia (a seguito di un abbassamento della radiazione critica minima per produrre energia). Queste supposizioni sono state validate attraverso lo sviluppo di un modello fisico in grado di descrivere il comportamento del pannello solare alimentato con PCS. Partendo dalle note equazioni di Hotter - Willier si è elaborato un modello in grado di considerare lo scambio di calore latente e di quantificare il calore prodotto e l'efficienza istantanea. Combinando questo modello con le condizioni al contorno di tre località italiane site a diverse latitudini (Palermo, Roma e Torino) è stata valutato il calore prodotto nel corso dell'anno mediante questa tecnologia ed il rendimento medio stagionale. Comparando questo risultato con quanto produrrebbe un pannello solare tradizionale alimentato ad acqua è stato dimostrato che la nuova tecnologia incrementerebbe l'efficienza globale di una quantità che varia 5% al 9% a seconda delle condizioni al contorno considerate (in Figura B-3 vengono confrontati il sistema innovativo e quello tradizionale ad acqua glicolata).

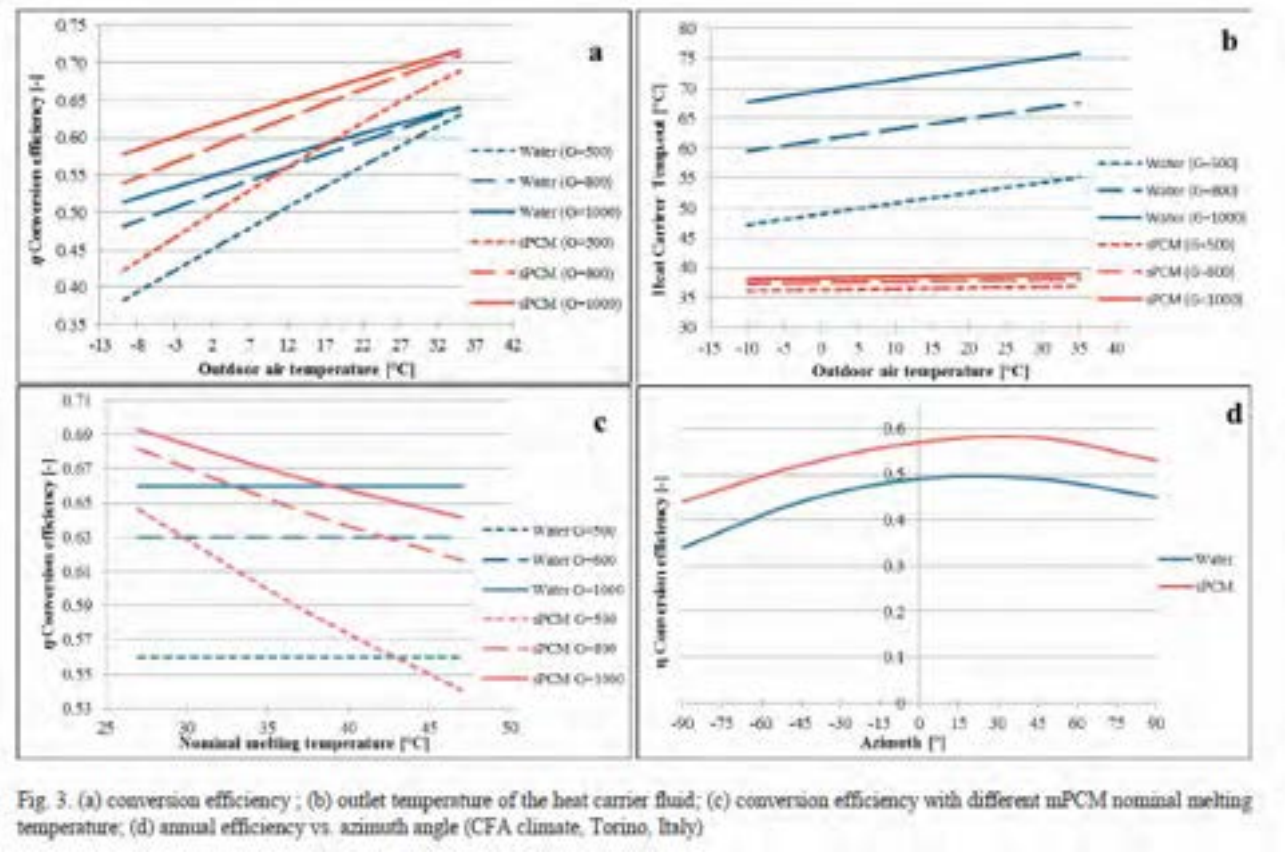

Fig. 3. (a) conversion efficiency ; (b) outlet temperature of the heat carrier fluid; (c) conversion efficiency with different mPCM nominal melting temperature; (d) annual efficiency vs. azimuth angle (CFA climate, Torino, Italy)

Figura B- 3. Confronti tra pannelli alimentati a PCS e ad acqua glicolata per diverse condizioni al contorno.

A queste considerazioni va aggiunto un ulteriore miglioramento legato all'abbassamento del livello termico all'interno dell'accumulo termico stesso e le conseguenti minori dispersioni con l'esterno e con il fluido termovettore dei circuiti di distribuzione del riscaldamento all'utenza. D'altro canto il fluido risulta avere una viscosità superiore a quella dell'acqua ed il consumo energetico delle pompe per la movimentazione del fluido termo-vettore aumenterà in modo proporzionale all'incremento di tale caratteristica. In questo ambito sono stati eseguiti numerosi studi di laboratorio, i quali, combinati ad una ricerca di letteratura, hanno portato a dimostrare che per concentrazioni di PCM inferiori al 40 % i benefici legati al miglioramento delle proprietà termofisiche sono sempre superiori al maggiore consumo dovuto alla movimentazione [9].

In seguito alle considerazioni di carattere teorico effettuate fino a questo punto, si è provveduto a realizzare un prototipo di sistema solare termico con accumulo alimentato a slurry PCM. Il dimostratore è stato costruito in scala reale e disposto sul tetto del Politecnico di Torino, onde permettere il monitoraggio del rendimento e del calore utile prodotto durante un intera stagione di riscaldamento. La costruzione di tale sistema ha costretto il gruppo di ricerca a pensare alcune soluzioni tecnologiche apposite, le quali fossero in grado di ovviare ad alcune piccole problematiche legate alla presenza di un fluido termovettore bicomponente [8]. Ad esempio è stato adottato un sistema di controllo diverso dai tradizionali algoritmi di funzionamento di un sistema solare e sono state previste appositi circuiti di by-pass per limitare il fenomeno della sedimentazione delle particelle solide sospese [7].

Figura B- 4. Il dimostratore in scala reale

2.3 *Approfondimento B2 (La caratterizzazione del materiale)*

Il materiale utilizzato è n-eicosano microincapsulato prodotto dalla ditta Microtek con temperatura di cambiamento di fase nominale a 37°C. In prima battuta è stato necessario calcolare l'entalpia specifica di cambiamento di fase a diverse concentrazioni di materiale. In secondo luogo è stato verificato e modellizzato il fenomeno chiamato creaming.
Il metodo T-history, proposto inizialmente da Zhang et al. nel 1999, è un procedimento semplice ed economico per determinare il calore specifico, il calore latente di fusione e la conducibilità termica dei materiali a cambiamento di fase. Un ulteriore vantaggio di questo metodo è quello di permettere l'utilizzo di campioni di dimensioni tali da consentire una corretta caratterizzazione anche dei materiali non omogenei come il mPCS [13]. I dati trovati in letteratura si riferiscono alla caratterizzazione del semplice PCM, ma possono essere utilizzati anche per la determinazione delle proprietà degli slurry a determinate concentrazioni.
Come è mostrato in figura 6 10, il sistema usato per l'analisi delle proprietà termofisiche del materiale è costituito da almeno due provette riempite rispettivamente di PCM e di un materiale di riferimento che spesso è acqua, viste le sue ben note proprietà termofisiche. Queste vengono preriscaldate in un bagno termostatico ad una temperatura superiore alla temperatura del cambiamento di fase del PCM, e successivamente esse vengono esposte alla temperatura ambiente, e quindi raffreddate.

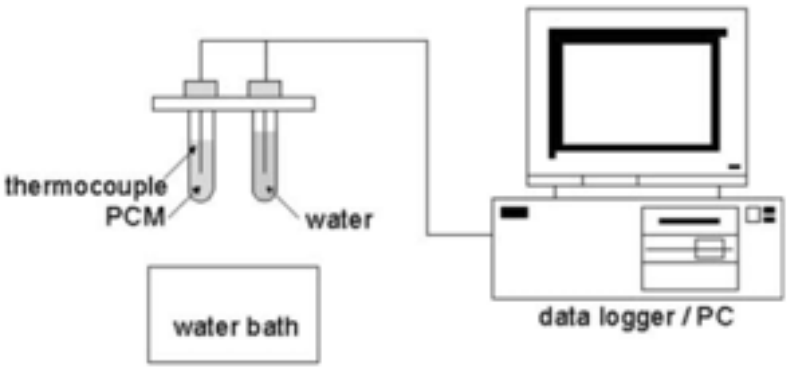

Figura B- 5 Schema del sistema sperimentale [14]

Durante il raffreddamento viene registrato l'andamento della temperatura in funzione del tempo trascorso dei materiali contenuti in entrambe le provette. Le curve che possono essere ottenute possono essere diverse se il PCM considerato mostra sottoraffreddamento o meno; nel primo caso infatti vi è un picco di temperatura minimo tra t0 e t1 che invece non è presente nel secondo caso (figura B 6) [15]. Le proprietà termiche del campione in esame possono essere ottenute confrontando le curve di riferimento dei rispettivi fluidi.

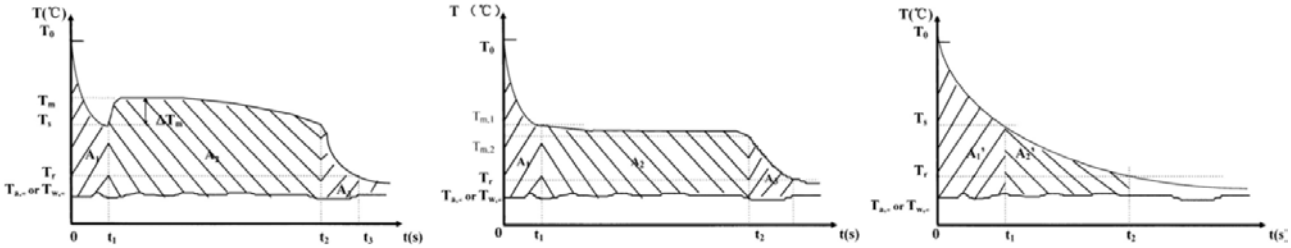

Figura B- 6 Curve ottenute dal T-history method. A sinistra: PCM con sottoraffreddamento; al centro: PCM senza sottoraffreddamento; a destra: materiale di riferimento [15].

Nell'esperimento svolto il T-history method è stato utilizzato per determinare la relazione tra entalpia e temperatura dello slurry micro-incapsulato contenente MPCM37 e acqua a concentrazioni del 20 %, 30 %, 40 % e 50 %. Per elaborare i dati acquisiti, si è scelto di utilizzare il metodo proposto da Marin et al., e quindi i risultati sono stati ottenuti implementando le equazioni descritte in [15] su Matlab. Prima di analizzare i dati relativi al materiale a cambiamento di fase si è scelto di validare l'apparato caratterizzando un fluido dalle proprietà già note, come il glicole etilenico.
Il processo per l'esecuzione dell'esperimento inizia con la realizzazione delle miscele contenenti diverse percentuali in massa di mPCM e acqua distillata. Per ogni diversa concentrazione è stata preparata una matrice che è stata in parte suddivisa nelle diverse provette ed in parte distribuita su cinque recipienti che sono stati posti in forno per due giorni, al fine dei quali, grazie all'evaporazione dell'acqua, è stato possibile risalire alla concentrazione media reale dello slurry considerato.
Le provette contenenti mPCS, insieme alle provette contenenti il materiale di riferimento, sono quindi state riscaldate, attraverso l'utilizzo dei bagni termostatici, fino a 60 °C, temperatura nettamente superiore alla temperatura di fusione del mPCS considerato (37 °C). Dopo la stabilizzazione della temperatura, le provette sono state esposte all'ambiente della camera termostatiche affinché iniziasse il raffreddamento. I dati ottenuti sono stati utilizzati per la stesura dell'articolo [16] che è stato presentato al congresso internazionale IBPC 2015 e che verrà pubblicato su una rivista Elsevier. Tale articolo viene riportato in allegato a questo report tecnico per consentire una migliore comprensione dell'attività svolta.
Le microcapsule utilizzate hanno una densità inferiore rispetto all'acqua, esse perciò tendono a portarsi in superficie, realizzando il fenomeno di creaming. Per analizzare meglio questo fenomeno si è deciso di fotografare quattro provette contenenti slurry con diversa concentrazione contemporaneamente con cadenza di 15 minuti, per circa 24 ore. La presente attività di ricerca ha portato ulteriori sviluppi e sperimentazioni condotte in collaborazione con il Prof. Fan Xueliang dell'università di Sochow (Cina), le quali hanno portato allo sviluppo di un modello in grado di predire l'evolversi del fenomeno di creaming in una sospensione di mPCS. Anche questa memoria è stata presentata al convegno internazionale IBPC 2015 [17] e viene allegata per facilitare la comprensione delle sperimentazioni.

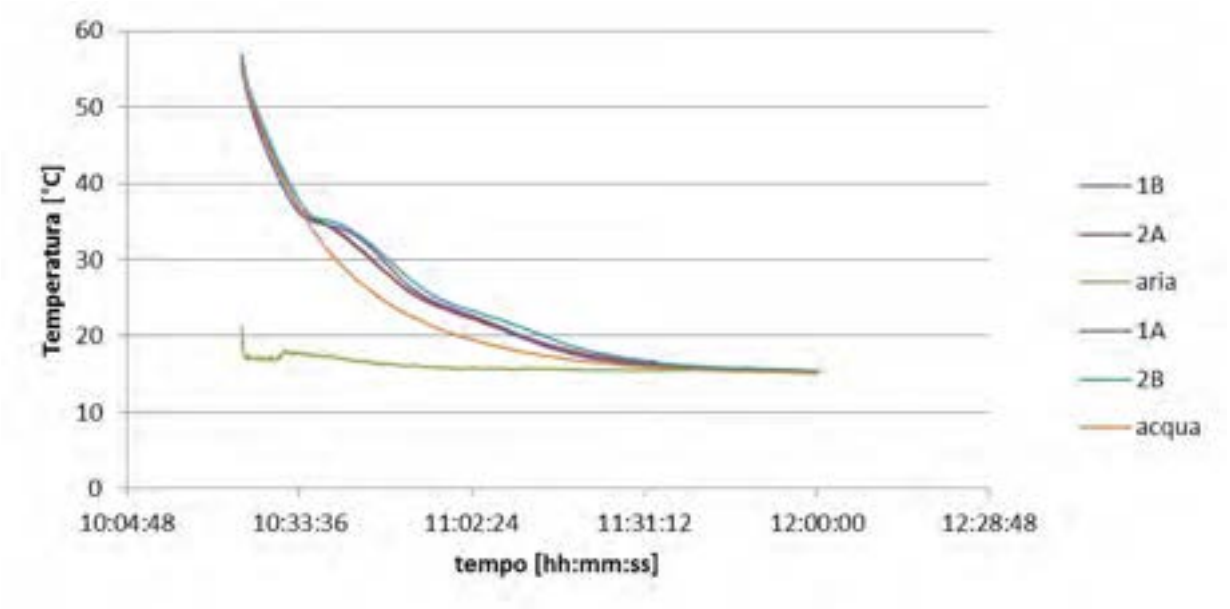

Figura B- 7 Curva T-t ottenuta per la concentrazione al 20%

2.4 Approfondimento C1 (definizione di metodi sperimentali per la valutazione delle prestazioni termiche a scala di materiale)

Il sistema di controllo e gestione che sta alla base del dimostratore utilizzato per le sperimentazioni viene descritto nel paper pubblicato su Energy and Building dagli autori di questo report. Si rimanda per tanto a tale documento allegato al fine di comprendere l'apparato sperimentale nei suoi dettagli.
Il dimostratore in questione è stato utilizzato per condurre una serie di sperimentazioni, parte delle quali tutt'ora in corso. In una prima fase si è cercato di caratterizzare il sistema pannello solare accumulo con un funzionamento tradizionale ad acqua glicolata, in modo da creare un reference case da utilizzare come confronto con il pannello funzionante a mPCS. Per questa tipologia di funzionamento sono stati determinati l'efficienza ed il calore prodotto dal sistema a partire dai dati monitorati. Si è inoltre proceduto a simulare un utenza tipo, estraendo dal dimostratore un carico termico variabile nel tempo. In seconda battuta si sono iniziate le sperimentazioni con una concentrazione di PCM del 10 % e si sta procedendo con ulteriori analisi di rendimento al variare della concentrazione. I grafici successivi riportano alcuni dei risultati ottenuti in questa fase sperimentale.

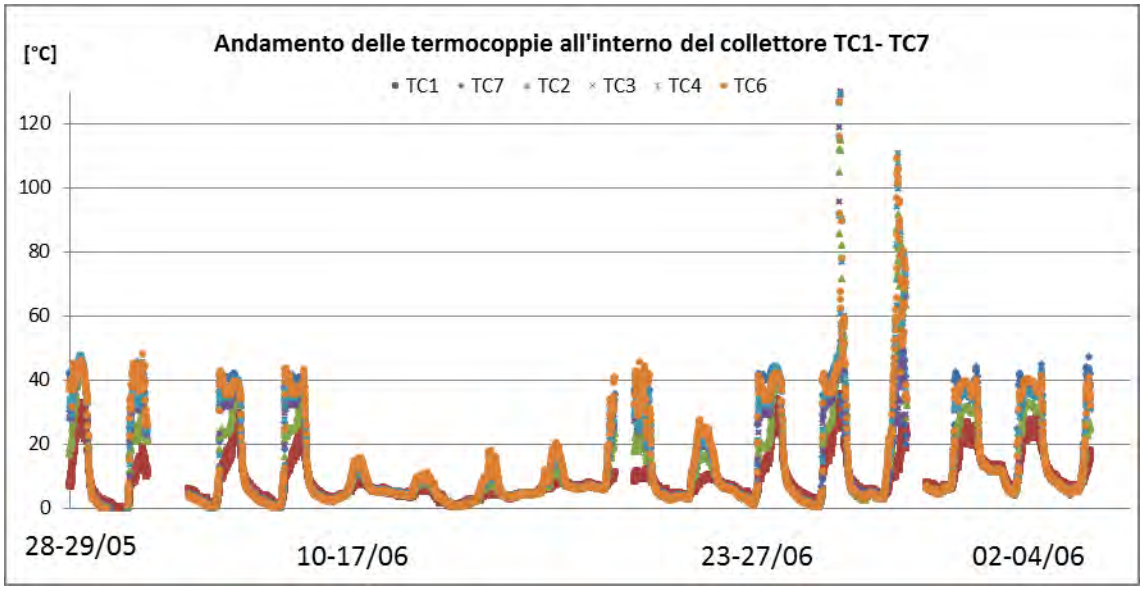

Figura B- 1 Andamento delle differenti termocoppie presenti all'interno del collettore solare TC1-TC7

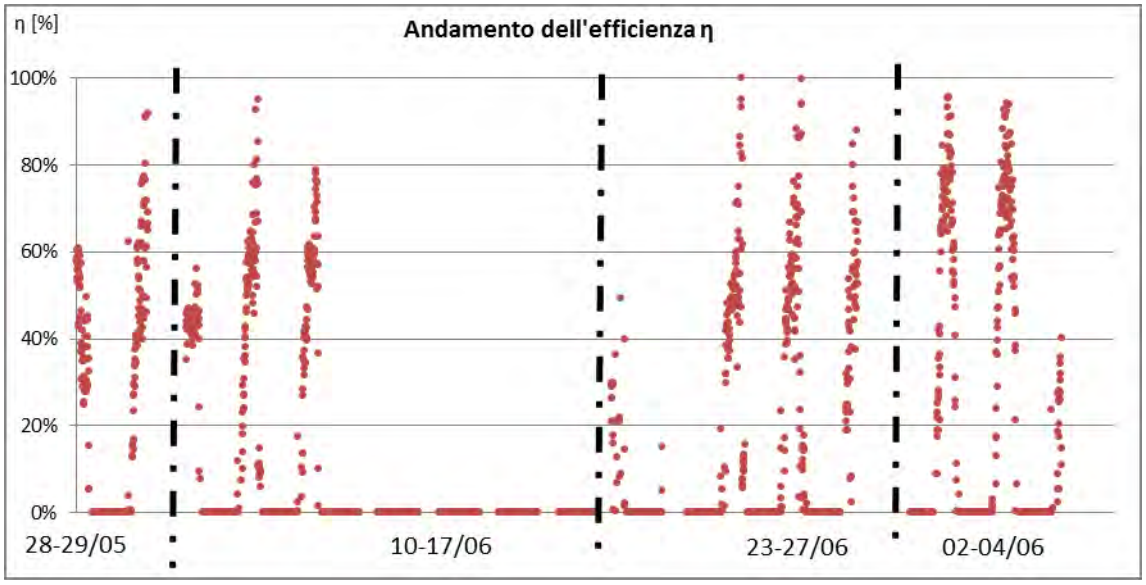

Figura B- 2 Efficienza

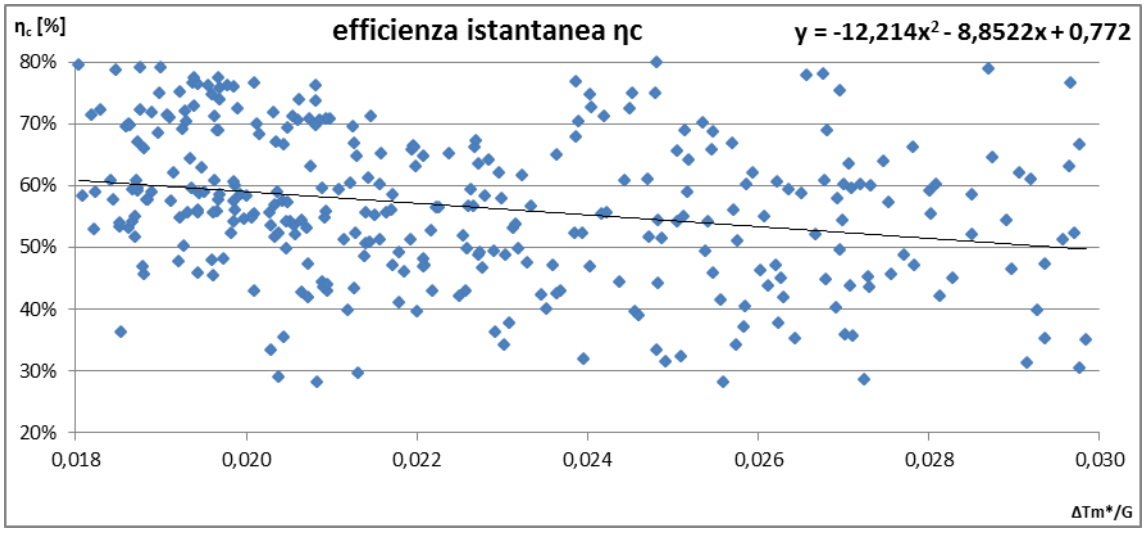

Figura B- 3 Efficienza istantanea

2.5 *Approfondimento C1 (definizione di metodi sperimentali per la valutazione delle prestazioni termiche a scala di materiale)*

I materiali superisolanti e più in particolare i pannelli isolanti sottovuoto VIP, sono caratterizzati da bassi valori di conduttività termica se comparati con materiali isolanti tradizionali. Per via delle loro evidenti proprietà termoisolanti, le attuali metodologie di misura previste dalle normative di riferimento per la misura delle proprietà termiche dei materiali per l'edilizia presentano alti livelli di incertezza di misura.
Ciò è principalmente dovuto al flusso termico ridotto che è possibile generare durante i test che per questi materiali raggiunge valori al limite dell'affidabilità degli strumenti.
L'obbiettivo del presente lavoro è quello di verificare l'affidabilità e l'accuratezza delle attuali metodologie sperimentali per la misura della conduttività termica dei materiali superisolanti. Nel dettaglio è stato investigato e verificato il metodo del termoflussimetro con anello di guardia come indicato nella norma UNI EN 12667:2001 che suggerisce una serie di criteri per la misura dei materiali isolanti, tuttavia l'affidabilità di misura per i materiali superisolanti come i pannelli isolanti sottovuoto VIP risulta non ancora dimostrata. Il presente lavoro vuole inoltre contribuire a ridurre le scarse conoscenze in tale ambito, per questa ragione sono state condotte una serie di test preliminari attraverso diverse campagne sperimentali con l'utilizzo del termoflussimetro con anello di guardia, variando: la temperature media delle prove e la differenza di temperature generate tra le facce del campione con l'obbiettivo di identificare le più corrette condizioni di prova.

2.5.1 La metodologia sperimentale

Le misure di laboratorio sono state effettuate con il fine di valutare la conduttività termica al centro del pannello VIP, le misure sono state condotte su un campione di dimensione (600x600 mm).
Per le misure della conducibilità termica apparente è stato utilizzato un apparato di tipo termoflussimetrico con anello di guardia LaserComp modello FOX600 a singolo provino Figura 2-4. Lo strumento è stato progettato e realizzato sulla base dei requisiti posti dalla norma ASTM C518-91 "Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurement and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flux Meter Apparatus" e UNI EN 12667:2001 "Determinazione della resistenza termica con il metodo della piastra calda con anello di guardia e con il metodo del termoflussimetro - Prodotti con bassa resistenza termica". Lo strumento è stato tarato presso la casa madre prima della consegna al DENERG – Politecnico di Torino (settembre 2011) utilizzando un provino di materiale tipo 1450b NIST SRM ed un provino di EPS (high accuracy expanded polystyrene) testato e certificato dal NIST secondo lo Standard ASTM C1132-89.

Le caratteristiche salienti dell'apparecchiatura sono riportate di seguito:

	MAX	MIN
Dimensione massima e minima del campione:	610 x 610 mm	300 x 300 mm
Spessore massimo e minimo del campione:	203 mm	0.3 mm
Temperatura massima e minima di test delle piastre:	85 °C	-15 °C

L'accuratezza nominale della misura, come dichiarato dal costruttore, è del $\pm$ 1% (del valore misurato). Tuttavia nel corso delle misure oggetto della presente relazione l'accuratezza di misura è stata determinata con il metodo della propagazione degli errori come previsto da: JCGM 100:2008 "Guide to the expression of uncertainty in measurement".

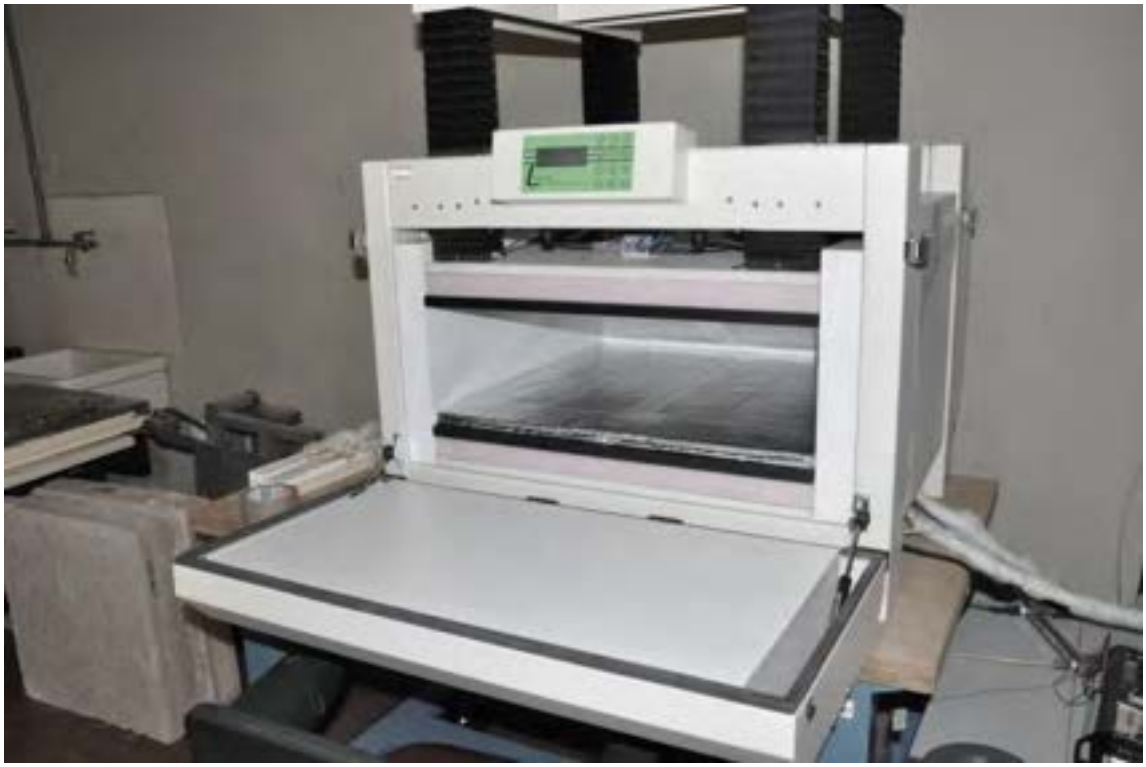

Figura 2-4. Termoflussimetro con anello di guardia LaserComp FOX 600.

Come noto, il principio di misura è basato sulla generazione di un differenziale di temperatura costante tra la piastra superiore e quella inferiore e successivamente misurare il flusso termico specifico e le temperature superficiali sulle due facce del campione testato. In Figura 2-5 si riporta uno schema di funzionamento dello strumento.

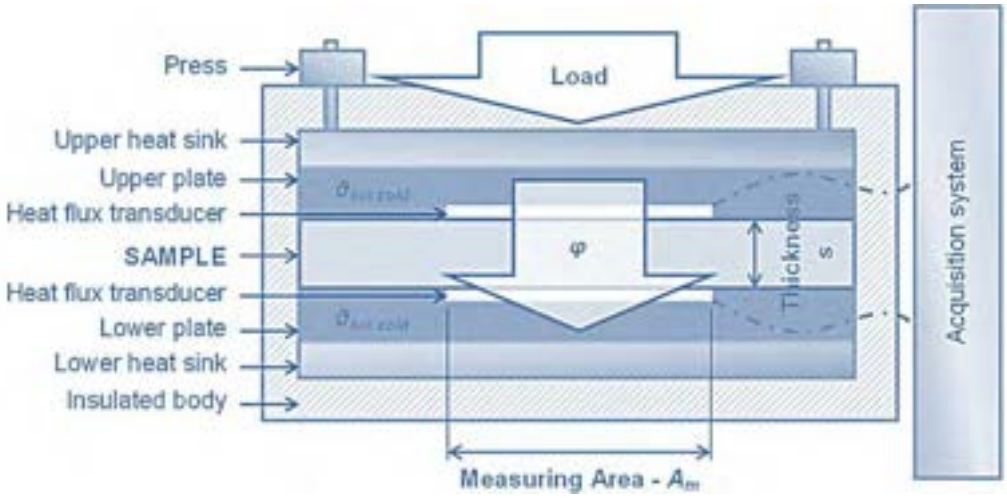

Figura 2-5. Schema di funzionamento del termoflussimetro con anello di guardia

La conduttività termica al centro del pannello λ_{cop} [W/mK] è stata calcolata utilizzando la seguente equazione:

$$\lambda_{cop} = (s \cdot \phi) / \Delta\theta$$

Dove:

- *s* è lo spessore del campione [m];
- *Φ* è il flusso termico specifico [W/m2];

- $\Delta\vartheta$ è la differenza di temperature tra le superfici inferiore e superiore del campione [°C].

Durante la fase sperimentale sono state condotte due differenti sessioni di misura:

- SESSIONE A: Sono stati condotti 6 test facendo variare la temperature media tra le due piastre ϑ_{avg} rispettivamente: (ϑ_{upper} per la temperatura superiore e ϑ_{lower} per quella inferiore), ma mantenendo costante la differenza di temperatura $\Delta\vartheta$ =25°C) e lo spessore del campione s=20mm;
- SESSIONE B: Sono stati condotti 14 test facendo variare la differenza di temperatura tra le due piastre $\Delta\vartheta$, mantenendo costante la differenza di temperatura tra le piastre ϑ_{avg} (= 30°C) e lo spessore del campione s=30mm.

La SESSIONE B è stata inoltre condotta con la finalità di valutare l'influenza della differenza di temperatura $\Delta\vartheta$ (e di conseguenza il flusso termico che attraversa il campione) sull'incertezza relativa di misura $\Delta\lambda$. L'incertezza di misura è stata determinata attraverso la metodologia prevista dalla UNI CEI ENV 13005:2000 considerando i principali quattro fattori che influenzano la misura sperimentale della conduttività termica al centro del pannello λ_{cop}:

- spessore del campione misurato s [mm],
- gradiente termico tra le due piastre $\Delta\vartheta$ [°C],
- il valore di segnale elettrico generato dal termoflussimetro E [µV]
- la costante di calibrazione S_{cal} [(W/m2)/µV].

2.5.2 Risultati

SESSIONE DI MISURE "A"
La conduttività termica dei materiali è generalmente influenzata dalla temperatura media a cui il campione è sottoposto. Per la maggior parte dei materiali da costruzione operando in un range ristretto di temperature, la legge che correla la conduttività termica alla temperatura può essere assimilabile ad una relazione di tipo lineare o quasi lineare. Tuttavia la stessa affermazione non può essere estesa ai pannelli isolanti sottovuoto VIP, In Figura 2-6 è possibile osservare la variazione di conduttività termica al centro del pannello λ_{cop} in funzione della temperatura media ϑ_{avg}. Il grafico mostra come la correlazione tra questi sue parametri sia fortemente non lineare e come l'interpolazione tra i vari punti trovati sperimentalmente sia di tipo polinomiale di grado secondo.

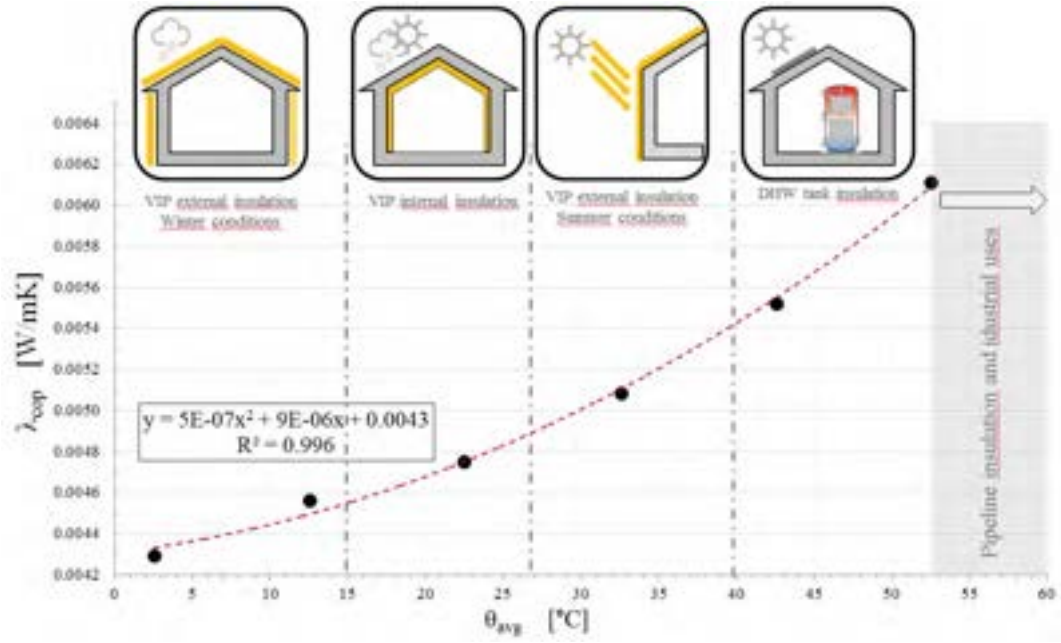

Figura 2-6. Relazione tra λ_{cop} e ϑ_{avg}.

Questa dipendenza non lineare della λcop dalla θavg genera una risposta variabile in termini di prestazione termica. Infatti per la stessa differenza di temperatura tra le piastre $\Delta\vartheta$ corrispondono conduttività termiche inferiori per basse temperature e superiori per alte temperature. Ad esempio mantenendo un gradiente medio di temperatura $\Delta\vartheta_{avg}$=10°C e sottoponendo il campione ad una variazione della sua temperatura media:

- da 40 a 50°C la differenza tra le due conduttività termiche misurate è di circa $\Delta\lambda_{cop}$≈0.5 mW/mK, che corrisponde ad una variazione di circa il 9% della relativa $\lambda_{cop_avg\ (40\text{-}50°C)}$=0.0057W/mK.
- da 10 a 20°C (gradiente medio di temperatura Δθavg=10°C) la differenza tra le due conduttività termiche misurate $\Delta\lambda_{cop}$≈0.0002W/mK, che corrisponde ad una variazione di circa il 4% della relativa $\lambda_{cop_avg\ (40\text{-}50°C)}$=0.0046W/mK.

Inoltre è possibile misurare una incremento non trascurabile di conduttività termica λcop superiore al 25% facendo variare la temperatura media da 10°C a 40°C.
Dai risultati ottenuti sperimentalmente è stato possibile dimostrare che la conduttività termica dei VIP è strettamente dipendente dalla temperatura di esercizio, osservando una variazione del range di conduttività termica che va da 0.0043 W/mK at 2.5°C (VIP installato come isolante all'esterno in condizioni invernali) a 0.0061 W/mK at 52.5°C (VIP installato all'esterno su parete esposta alla radiazione solare in condizioni estive o impiegato come isolante per accumulatori per acqua calda sanitaria).
Tale fenomeno è strettamente legato alla tipologia della struttura interna dei VIP, all'interno del materiale costituente il nucleo (generalmente silice pirogenica) vi sono intrappolate piccole quantità d'aria (il vuoto non è perfetto), ma si tratta di aria ad una pressione di circa 3hPa e in ogni caso non inferiore a 10hPa [1], tale grado di vuoto tende a decadere con gli effetti dovuti all'invecchiamento del materiale di involucro i.e. (danneggiamento, permeazione di vapore d'acqua).
Generalmente l'anima (matrice solida) dei materiali isolanti sottovuoto VIP è costituita da materiali porosi che a basse pressioni presentano un diametro medio dei pori inferiori al libero camminamento medio dell'aria, per questo motivo le modalità di trasmissione del calore prevalenti risultano: lo scambio termico conduttivo attraverso la matrice solida e radiativo all'interno dei pori diventando trascurabile lo scambio termico convettivo all'interno dei pori. Pertanto la conduttività termica totale dei VIP riassunta nella seguente equazione [2]:

$$\lambda_{\text{core}} = \lambda_S + \lambda_R + \lambda_G + \lambda_{cv} + \lambda_{coupling}$$

Dove:

- λ_{core}: VIP conduttività termica del nucleo [W/mK];
- λ_S: conduttività termica della matrice solida [W/mK];
- λ_R: conduttività termica dovuta allo scambio radiativo [W/mK];
- λ_G: conduttività termica della parte gassosa [W/mK];
- λ_{cv}: convezione all'interno dei pori [W/mK];
- $\lambda_{coupling}$: conduttività dovuta agli effetti di accoppiamento [W/mK].

Tutti questi effetti devono essere ridotti al minimo al fine di ottenere valori molto bassi di conduttività termica λ_{core} ad esempio:

- Il termine λ_s dipende dalla struttura del materiale in considerazione, in particolare dalla sua densità, ma anche dalla temperatura e dalla pressione esterna, in particolare cresce all'aumentare di entrambe;
- Il termine λ_R è la componente relativa all'irraggiamento termico. Per diminuire questo valore, viene integrato alla lastra di silice pirogenica del carburo di Silicio (SiC) che riduce l'assorbimento di radiazione nel campo dell'infrarosso, migliorando in questo modo le prestazioni diminuendo λ_R;

λ_G: dipende dal libero camminamento dell'aria delle molecole gassose e dalla dimensione media dei pori, tale valore è trascurabile per materiali con pori di dimensione nanometrica;
λ_{cv} and $\lambda_{coupling}$: il loro effetto diventa importante a pressioni maggiori per l'interazione tra le fibre e le polveri presenti nel materiale costituente il nucleo.

La pressione interna è influenzata dalla temperatura. Le variazioni di pressione e temperatura hanno l'effetto di modificare il peso relativo nei termini dell'equazione sopracitata. Questo fenomeno influenza la λ_{core} e come diretta conseguenza anche la λ_{cop}.
Il comportamento non lineare di VIP potrebbe essere causato principalmente dalla presenza dell' aria all'interno del VIP, poiché per basse pressioni la variazione di pressione stessa è molto sensibile alle variazioni di temperatura.

SESSIONE DI MISURE "B"
La relazione tra la conduttività termica λ_{cop} e la temperatura di esercizio può essere osservata da un altro punto di vista, infatti se questa è dipendente dalla temperatura è anche dipendente dalla differenza di temperatura generata durante la misura $\Delta\vartheta$.

Infatti, con l'aumentare della differenza di temperatura $\Delta\vartheta$ cresce anche il flusso di calore che attraversa il campione: maggiore è il flusso da cui viene calcolato la conducibilità termica λ, minore è l'incertezza relativa $\Delta\lambda$. Figura 2-7 mostra questa relazione dove: ($\Delta\vartheta$=10°C è il minimo differenziale termico tra le piastre dello strumento di misura, come previsto dalla UNI EN 12667:2002).

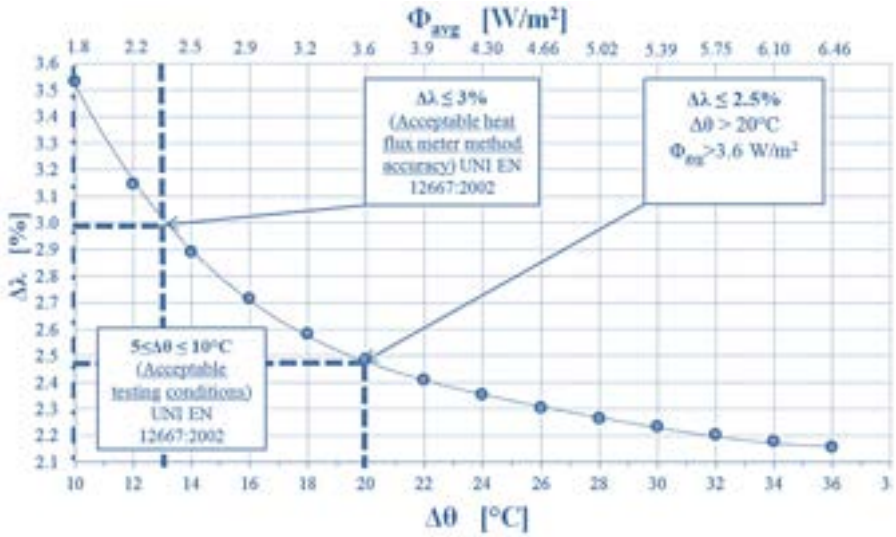

Figura 2-7. Incertezza relativa Δλ in funzione di Δθ, e del flusso termico Φavg.

Dal grafico è possibile osservare come sia chiaramente dimostrata la precedente ipotesi:

- tra 10°C e 24°C di Δθ, la riduzione di incertezza relativa risulta superiore al 34%;
- tra 24°C e 36°C di Δθ, la riduzione di incertezza relativa risulta inferiore al 10%.

Da ciò si evince che per alte differenze di temperatura $\Delta\vartheta$, la conduttività termica λ_{cop}, misurata con il termoflussimetro risulta più stabile e maggiormente affidabile mostrando un andamento asintotico per alte differenze di temperatura $\Delta\vartheta$.
Figura 2-8 mostra invece come il valore di conduttività termica misurata decresca al crescere della differenza di temperatura confermando la relazione tra $\Delta\lambda$ e $\Delta\vartheta$. La conduttività termica misurata con basse differenze di temperatura (da 10 a 24°C) mostra variazioni molto alte, al contrario per alte differenze di temperatura $\Delta\vartheta$ (da 24 a 36°C) il valore di conduttività misurato presenta meno oscillazioni e risulta meno sensibile a variazioni di $\Delta\vartheta$.

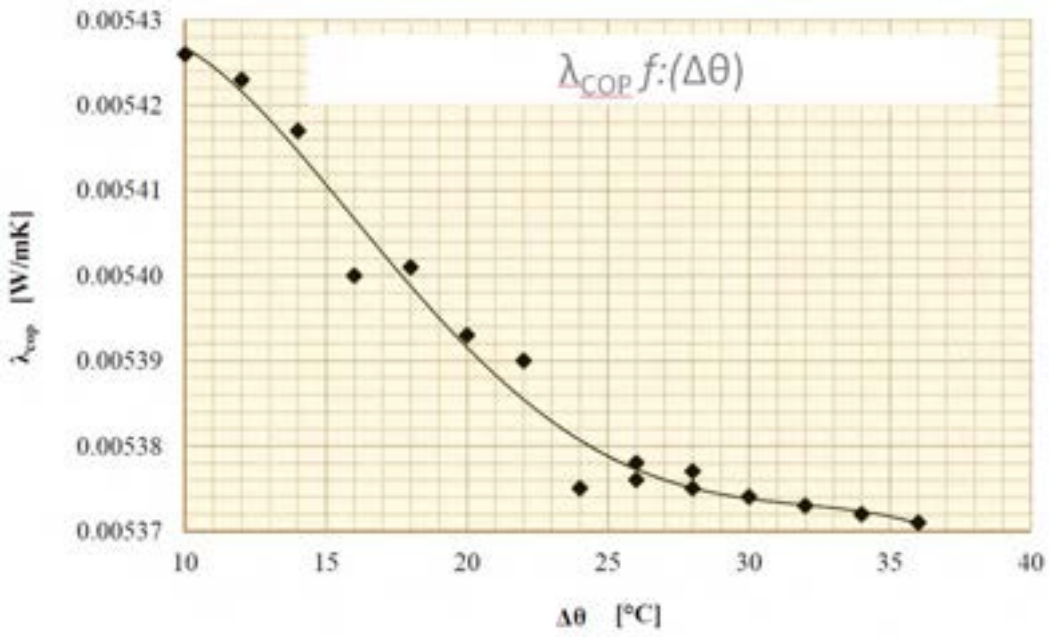

Figura 2-8. Conduttività termiche misurate λcop in funzione di Δθ. (I test con Δθ pari a 26 er 28°C sono stati ripetuti due volte).

2.5.3 Discussione dei risultati

La norma tecnica per la misura della resistenza termica dei materiali da costruzione UNI EN 12667:2002, fornisce una serie di valori di accettabilità di temperature e accuratezze di misura, per la misura di materiali ad alta resistenza termica con il metodo del termoflussimetro (annex C) o della piastra calda con anello di guardia (annex B). Per ciò che concerne il metodo con termoflussimetro i valori limite risultano:

- limite minimo di differenza di temperature tra le face del campione pari a 5°c;
- limite superiore di differenza di temperature tra le face del campione pari a 10°C;
- valore atteso di incertezza di misura ±3 % (quando la temperature media del test è vicina alla temperatura del laboratorio).

Sulla base dei risultati sperimentali, condotti al fine di ottenere valori incertezza inferiori al ±3 %, si raccomanda di generare durante le prove una differenza di temperatura tra la piastra superiore ed inferiore $\Delta\vartheta$ non inferiore a 13°C e comunque generando un flusso termico non inferiore a 2.35 W/m^2.
I risultati ottenuti hanno dimostrato come le condizioni di prova possano influenzare la misura della conduttività termica, pertanto i valori di conduttività termica dovrebbero essere determinati tramite prove con temperature medie, pari o vicine a quelle di esercizio del materiale.
Tali risultati suggeriscono la necessità di un' implementazione/revisione delle procedure di misura previste dalle attuali norme per la misura delle proprietà termofisiche di questi materiali.

2.6 Approfondimento C2 (Definizione di modelli e metodi di valutazione numerico-sperimentale dei ponti termici nei materiali superisolanti a scala di componente)

I materiali isolanti sottovuoto VIP sono realizzati sottoforma di pannelli prefabbricati racchiusi in un involucro multistrato metallizzato con la funzione di mantenerne il vuoto interno, la presenza di tale materiale di involucro rappresenta una delle principali criticità connesse alla loro applicazione. Questo perché per poter applicare i pannelli su una superficie di involucro edilizio è necessario accoppiare diversi pannelli tra di loro, utilizzando giunti strutturali e sistemi di fissaggio meccanico generando inevitabilmente una serie di ponti termici.
L'obbiettivo del presente lavoro è stato quello di analizzare le principali criticità di questa tecnica di isolamento termico per l'edilizia. Una campagna sperimentale attraverso l'utilizzo di un termoflussimetro con anello di guardia è stata avviata con il fine di determinare il decadimento prestazionale nel caso di VIP assemblati tra di loro a causa dei ponti termici dovuti alla presenza di diversi materiali di giunto.
I risultati sperimentali sono stati successivamente utilizzati per poter calibrare un modello numerico basato sul metodo del bilancio energetico.
Tre differenti tipologie di ponte termico sono state identificate:

- Ponte termico dovuto all'involucro del VIP;
- Ponte termico dovuto ala presenza di giunti d'aria tra due pannelli affiancati;
- Ponte termico dovuto alla presenza di giunti strutturali tra pannelli (listelli, montanti).

Poiché i ponti termici dovuti alla presenza del materiale di involucro sono stati oggetto di ampia trattazione [10], solo le ultime due tipologie di ponte termico citate (più strettamente legate alla reale applicazione in edilizia) sono state oggetto di analisi del presente lavoro.
In particolare nel caso di pannelli VIP installati su pareti verticali, la problematica dei ponti termici dovuti alla presenza di supporti per il montaggio (montanti, traversi) assume particolare rilevanza a scala di edificio.
Tipicamente i materiali che costituiscono i giunti di supporto possono essere: (Metallo, Legno, medium density fiberboard MDF, polistirene estruso XPS etc.)
Per i VIP impiegati su elementi orizzontali quali coperture o pavimenti, possono essere installati senza l'ausilio di giunti strutturali, poiché è sufficiente il loro incollaggio, in questi casi vi è però la presenza di giunti d'aria che come i giunti strutturali devono essere accuratamente considerati.

In alcuni studi [16], la presenza dei ponti termici è stata analizzata su casi reali in cui i VIP sono accoppiati con altri strati isolanti a livello di simulazione numerica. Sprengard e Holm [17] si sono occupati dell'analisi numerica dell'effetto dei ponti termici in presenza di layers aggiuntivi, per diverse dimensioni di VIP e diverse dimensioni di giunto d'aria. Tuttavia questi studi non hanno definitivamente chiarito la relazione tra le performance dei VIP e i loro giunti di assemblaggio e i modelli numerici risultano essere non ancora sperimentalmente validati.
L'obbiettivo del presente lavoro è stato quello di determinare sperimentalmente il comportamento termico globale dei VIP assemblati in termini di (conduttività termica equivalente λeq, e trasmittanza termica lineica ψ) e la loro stretta dipendenza da:

- dimensione dei giunti d'aria tra i pannelli VIP;
- materiale costituente i giunti strutturali realmente usati in edilizia;
- dimensione dei pannelli.

Infine è stato elaborato un modello numerico basato sul metodo del bilancio di energia, successivamente validato attraverso la comparazione con i risultati sperimentalmente ottenuti.

2.6.1 Metodologia

METODOLOGIA SPERIMENTALE
L'analisi sperimentale è stata condotta grazie all'utilizzo di un termoflussimetro con anello di guardia LaserComp FOX600 descritto nel paragrafo 2.1.1.
Per le analisi sperimentali sono stati preliminarmente testati tutti i pannelli di diversi spessori (10 e 20mm) e successivamente sono stati realizzati dei campioni costituiti da due pannelli VIP accoppiati attraverso giunti d'aria Figura 2-9 e giunti strutturali Figura 2-10, i provini sono stati successivamente inseriti nell'apparato termoflussimetrico per la misura della conduttività termica equivalente come illustrato in Figura 2-11.

Figura 2-9. Giunto d'aria tra due pannelli VIP accostati.

Figura 2-10. Giunto strutturale (XPS) tra due pannelli VIP.

Figura 2-11. Pannelli con giunto all'interno dell'apparato termoflussimetrico

Il termoflussimetro è in grado di misurare la resistenza termica R dei campioni, la conduttività termica equivalente $\lambda_{eq,EXP}$ dei pannelli assemblati (due pannelli con giunto), è stata successivamente determinata sulla base dello spessore nominale dei campioni utilizzando la seguente equazione:

$$\lambda_{eq,EXP} = s/R$$

Dove s rappresenta lo spessore nominale dei pannelli.
La dimensione totale delle piastre è pari a 600x600mm, tuttavia l'area di misura A_m è ristretta alla porzione centrale delle piastre per un'area di 254x254mm come illustrato in Figura 2-12.

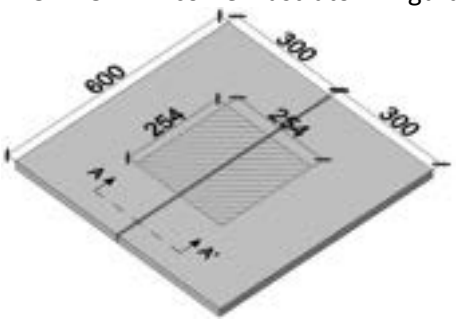

Figura 2-12. Area di misura dello strumento.

La campagna sperimentale è stata condotta su pannelli di dimensione 600x300mm e su diverse tipologie di giunto:

- Giunti d'aria;
- Giunti in MDF;
- Giunti in XPS;

La larghezza dei giunti strutturali è stata mantenuta costante (pari a 36mm), al contrario per i giunti d'aria (dove le prestazioni sono notevolmente influenzate dalla larghezza del giunto) sono state effettuate analisi su quattro diverse larghezza di giunto, impiegando differenti distanziatori metallici. L'esatta larghezza dei giunti è stata successivamente determinata attraverso indagine fotografica come mostrato in Figura 2-13.

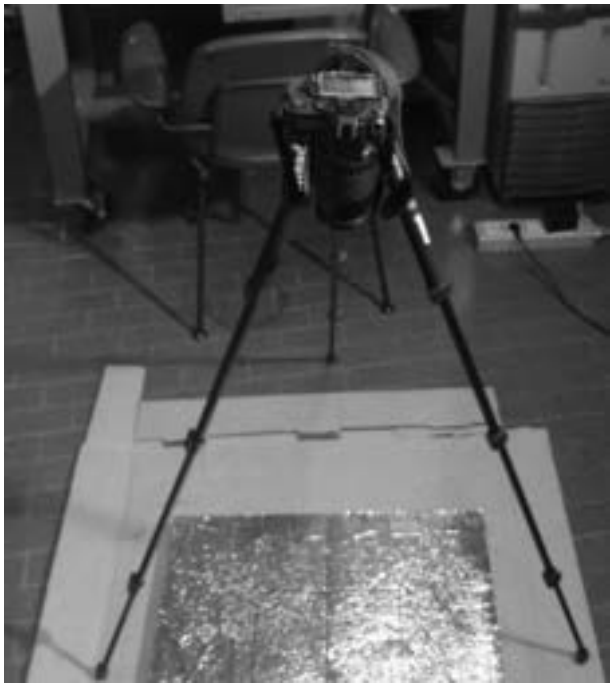

Figura 2-13. Determinazione della larghezza di giunto attraverso indagine fotografica.

I pannelli VIP giuntati sono stati fotografati attraverso una fotocamera ad alta risoluzione (12.3 megapixel). Le immagini sono state sottoposte a fotoraddrizzamento, successivamente sono state scalate e misurate attraverso software CAD. L'area del giunto è stata misurata attraverso la generazione di una poligonale chiusa nel software CAD, La larghezza del giunto è stata infine determinata attraverso il rapporto tra l'area misurata e la lunghezza del giunto (pari all'area di misura del termoflussimetro) uguale a 254mm.
Considerando la conformazione dell'involucro, il quale presenta una parte risvoltata necessaria per la saldatura, è da precisare che la misura è avvenuta sul lato in cui il giunto presentava la maggior larghezza, come è possibile osservare in Figura 2-14.

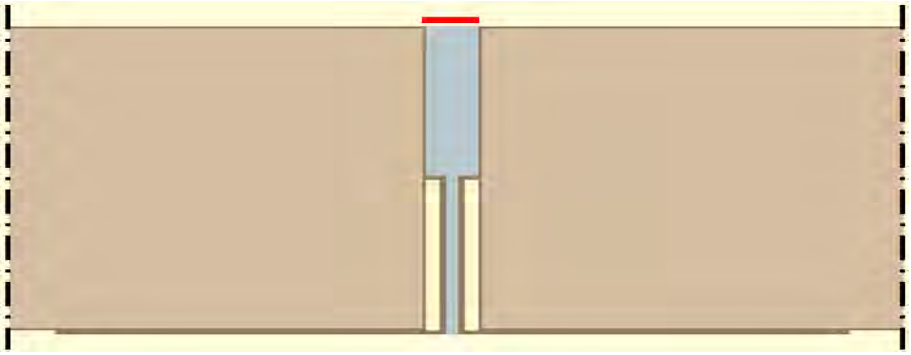

Figura 2-14 Schema del giunto d'aria (in rosso il lato misurato)

I test sono stati effettuati su pannelli con involucro di tipo MF3 (costituito da tre strati di PET, uno strato di alluminio e uno strato di PE).
La conduttività termica dei singoli pannelli VIP e dei materiali costituenti i giunti strutturali sono state preliminarmente determinate attraverso la misura con termoflussimetro.
I test sono stati infine condotti sui pannelli assemblati con giunto, (2 tipologie di giunto strutturale, 4 tipologie di giunto d'aria, per due diversi spessori di pannello 10 e 20mm) per un totale di 12 test.
La temperatura di set-point durante i test è stata mantenuta costante a: ϑ_{low}=35°C=308K and ϑ_{up}=15°C=298K (ϑ_{avg}=25°C=298K).
Tutti i giunti sono stati sigillati con nastro adesivo alluminato al fine di prevenire fenomeni di condensazione tra i pannelli durante i test.

ANALISI NUMERICA

Le analisi numeriche sono state condotte attraverso l'uso del software physibel BISCO, su cui è stato necessario formulare alcune ipotesi semplificative:

- Il valore di conduttività al centro del pannello λ_{cop} è stato determinato per via sperimentale, tale valore è stato impiegato nel modello di calcolo assumendo trascurabile la conduttività dell'involucro (con tale metodo infatti sarà misurata unitamente la conduttività del nucleo e dell'involucro). Ovviamente sarà poi necessario valutare se effettivamente questa ultima ipotesi sia corretta;

- la stratigrafia dell'involucro è stata semplificata in un unico strato, in quanto non è possibile modellare sul software FEM i vari strati separatamente. Questo approccio era già stato utilizzato da M. Tenpierik [9],[10] che, nella definizione di un modello analitico per studiare l'effetto dei ponti termici nei VIP, non aveva modellato separatamente i vari layers dell'involucro, ma li aveva combinati in gruppi di simile conduttività termica come è possibile osservare in Figura 2-15.

Per l'elaborazione è stato necessario calcolare la conduttività termica equivalente dell'involucro, valutandola in modo differente a seconda che esso fosse attraversato da un flusso termico ortogonale alla superficie (envelope H, λ_h) o parallelo alla stessa (envelope V, λ_v) come illustrato in Tabella 1, di seguito si riportano le equazioni impiegate per il calcolo delle rispettive conduttività dell'involucro

(3

$$\lambda_h = \frac{S_{tot}}{\sum \frac{s_i}{\lambda_i}}$$

$$\lambda_v = \frac{\sum s_i \cdot \lambda_i}{S_{tot}}$$

Dove:

S_{tot}	[m]	spessore totale dell'involucro
s	[m]	spessore dei singoli strati i-esimi
λ	[W/mK]	conduttività termica dei singoli strati i-esimi

Tabella 1. Calcolo delle conduttività termiche equivalenti equivalenti λ_h e λ_v dell'involucro

ENVELOPE				
	s [µm]	s [mm]	s [m]	λ[W/mK]
outside				
PET	12	0,012	0,000012	0,19
Al	0,1	0,0001	0,0000001	160
PET	12	0,012	0,000012	0,19
Al	0,1	0,0001	0,0000001	160
PET	12	0,012	0,000012	0,19
Al	0,1	0,0001	0,0000001	160
PE	50	0,05	0,00005	0,33
inside				
H (horizontal)	86,3	0,0863	0,0000863	**0,253**
V (vertical)	86,3	0,0863	0,0000863	**0,827**

Per quanto riguarda gli angoli dell'involucro, attraverso l'elaborazione con BISCO, si è potuto appurare che l'assunzione di uno strato o di un altro non implicava variazioni nei risultati ottenuti: per questo si è considerato come envelope V, ponendosi nella condizione più sfavorevole;

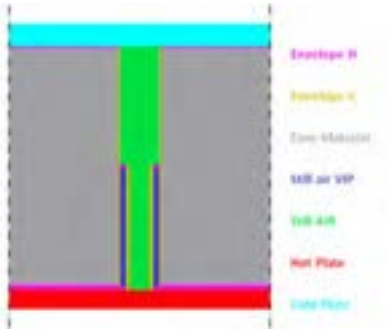

Figura 2-15. Esempio di modellazione di giunto sul software BISCO.

l'importanza dell'accuratezza con cui vengono accostati i pannelli VIP è stata studiata ipotizzando una lama d'aria ferma di spessori variabili (larghezze misurate dei quattro giunti d'aria). La sua conduttività è stata valutata come intercapedine orizzontale seguendo la metodologia di calcolo UNI 6946 app.B considerando un'emissività del materiale ε=0.9 e un flusso termico discendente.
Il software BISCO permette di elaborare i dati basandosi su modelli geometrici riconosciuti come bitmap.
Alcuni aspetti che devono essere sottolineati sono:

- la dimensioni dei modelli variano in base allo spessore dei pannelli (1cm e 2cm) e al tipo di giunto, pannelli direttamente accostati o interposizione del giunto strutturale. L'elaborazione è stata effettuata considerando una superficie pari a 254x254 mm con al centro il giunto. Tali misure sono stabilite delle dimensioni dell'area di misura del termoflussimetro. Questo permette di non modellare le condizioni sui bordi non interessati dal giunto, come illustrato in Figura 2-16;

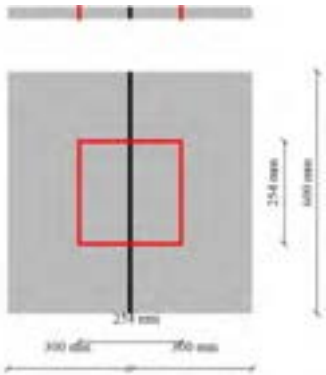

Figura 2-16. Confronto tra le dimensioni dei pannelli VIP e relativa superficie d'analisi di 254x254 mm.

- l'envelope o involucro (spessore=0,0863 mm) è modellato con il minimo spessore possibile di 1 pixel (0,17 mm), determinando in questo modo uno spessore circa doppio rispetto a quello reale. Tale problema è risolto modificando proporzionalmente il valore della conduttività termica: per questo all'envelope H è assegnata una conduttività λ_h=0,128 W/mK (anziché 0,253 W/mK) e a quello V λ_v=0,420 W/mK (anziché 0,827 W/mK);
- non sono state considerate le resistenze superficiali interna ed esterna;
- viene imposta una differenza di temperatura ΔT=20 °C tra T=35°C e T=15°C, che determina un flusso termico dall'alto verso il basso (la stessa differenza di temperatura utilizzata sperimentalmente).

L'elaborazione su BISCO si basa sul concetto della triangolazione. Il numero di pixel per la triangolazione dei vari strati è definito in modo discrezionale in base al loro spessore (più sottile è lo strato, maggiore è il numero di pixel) ed è stato infittito progressivamente, finché il risultato di flusso termico non è rimasto invariato (mesh indipendence analysis) Figura 2-17, mentre in Figura 2-18 è possibile osservare l'interfaccia del software BISCO.

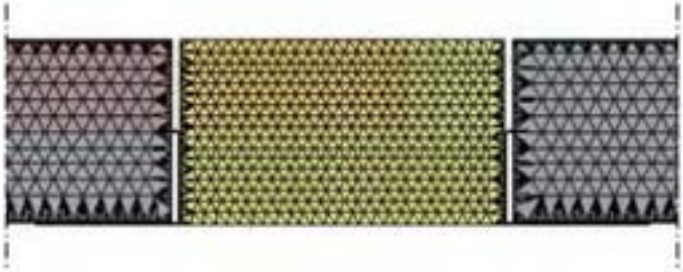

Figura 2-17. Triangolazione della mesh.

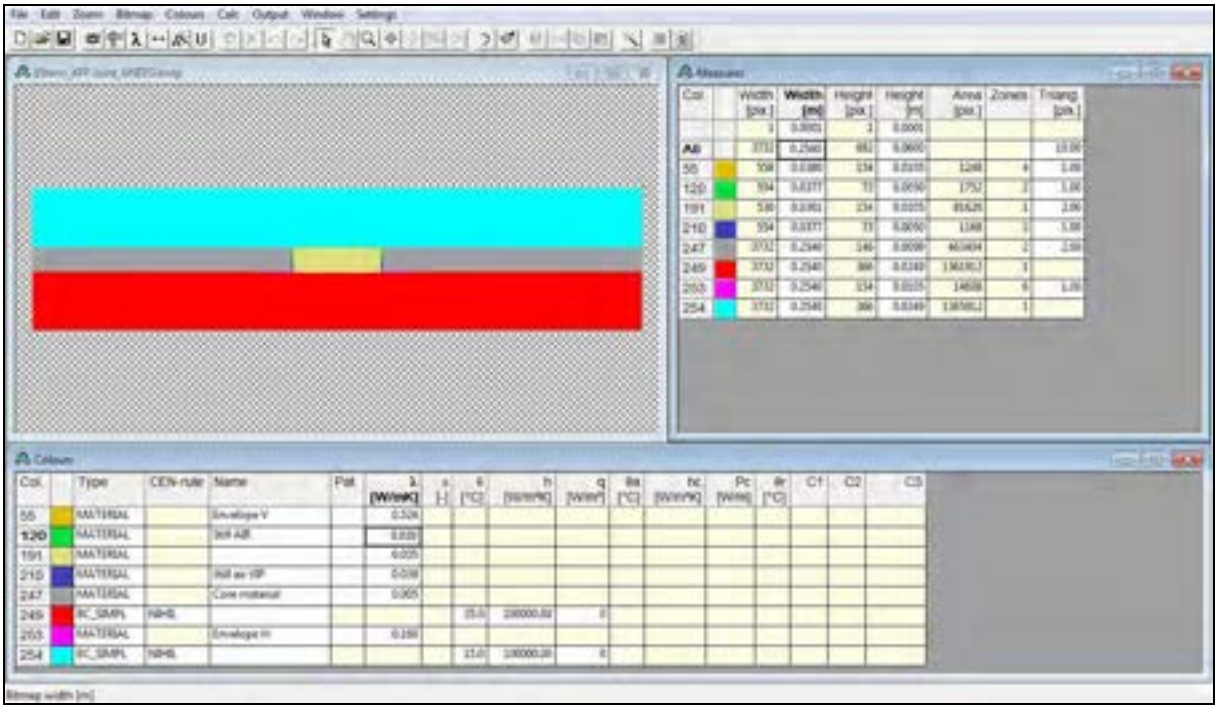

Figura 2-18. Interfaccia del software BISCO.

I risultati ottenuti possono essere visualizzati tramite le curve isoterme o i valori numerici del flusso termico, utili per riuscire a definire la trasmittanza termica lineica del ponte termico, come illustrato in Figura 2-19.

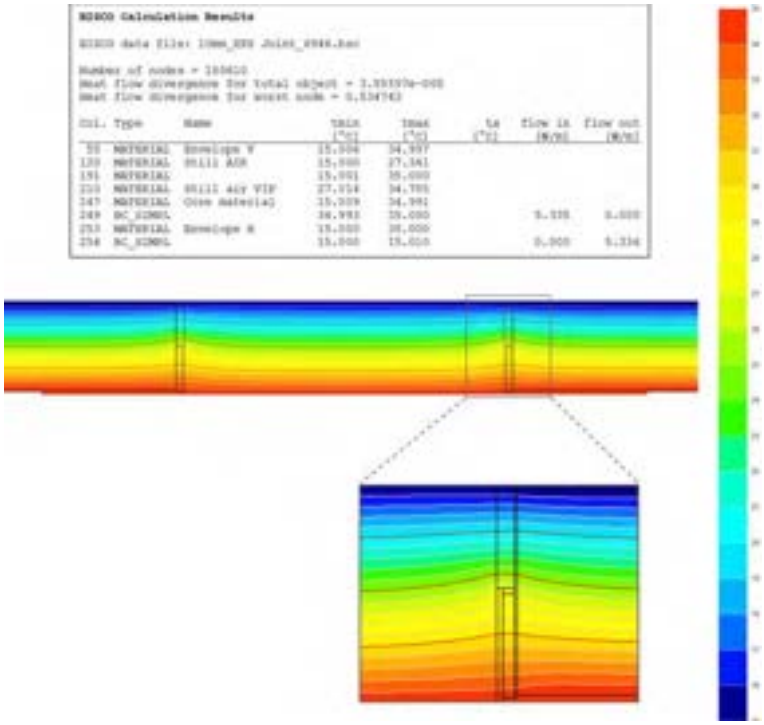

Figura 2-19. Risultati di flusso termico e profilo delle isoterme.

Dai risultati ottenuti attraverso l'analisi numerica è stato possibile determinare la conduttività equivalente del campione simulato, attraverso la seguente equazione:

$$\lambda_{eq,FEM} = \frac{\phi_{FEM} \cdot s}{l \cdot \Delta\vartheta}$$

Dove:

- ϕ_{FEM} è il flusso termico simulato per unità di lunghezza del campione;
- s è lo spessore del campione
- l è la lunghezza del ponte termico;
- $\Delta\vartheta$ è la differenza di temperatura tra il lato superiore ed inferiore.

Analogamente all'analisi sperimentale, sono state condotte 21 simulazioni, considerando le stesse condizioni (geometria, condizioni al contorno e tipologia di giunti) dei test sperimentali.
L'area di simulazione di 254x254mm include l'intera regione in cui il flusso termico passa ad essere perfettamente perpendicolare al campione (flusso indisturbato), in accordo con la normativa EN ISO 14683:2008 [23].
Per la quantificazione del ponte termico, ne è stata determinata la trasmittanza termica lineica ψ calcolata secondo il metodo previsto in [23], attraverso la seguente equazione:

$$\psi = \frac{\dot{Q} - \frac{\lambda_{cop}}{s} \cdot A_m \cdot \Delta\vartheta}{l \cdot \Delta\vartheta}$$

con:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda_{eq}}{s} \cdot A_m \cdot \Delta\vartheta$$

Dove:

- $\dot{Q}$ è il flusso termico totale in presenza di ponte termico;

- A_m è l'area del campione su cui viene effettuata la misura (254x254mm)
- λ_{eq} è uguale alla conduttività termica equivalente tenendo conto dell'effetto del ponte termico, $\lambda_{eq,EXP}$ (determinato sperimentalmente), $\lambda_{eq,FEM}$ (calcolato attraverso simulazione).

2.6.2 Risultati

Le analisi sperimentali sono state condotte con la finalità di determinare le prestazioni termiche di VIP assemblati con giunto, tenendo in considerazione:

- L'influenza di variabili geometriche (spessore e dimensione dei pannelli e larghezza del giunto d'aria);
- L'influenza di variabili termofisiche (resistenza termica del giunto strutturale).

In prima battuta sono state determinate sperimentalmente le conduttività termiche dei singoli materiali costituenti i provini.
In seconda battuta si è proceduto ad effettuare la validazione del modello di calcolo numerico 2D (attraverso comparazione con i risultati sperimentali), verificando l'applicabilità del modello di calcolo per tutte le tipologie di giunto.
In Figura 2-20 sono indicate le due diverse tipologie di giunto. In Tabella 2 sono riportati i risultati di conduttività termica misurata per ciascun materiale costituente i campioni, mentre in Tabella 3 Conduttività termica delle cavità d'aria calcolata secondo EN ISO 6946:2008 [22].

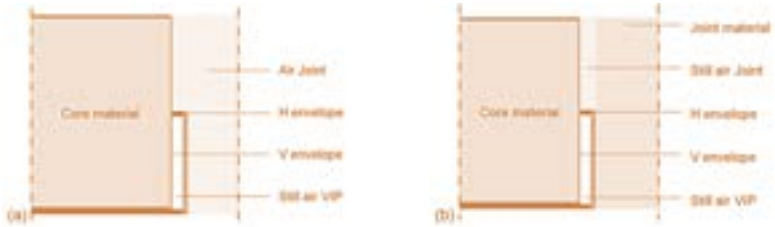

Figura 2-20. Giunti in VIP assemblati, a) giunto d'aria, b) giunto strutturale

Tabella 2 Conduttività termica misurata dei vari materiali impiegati

s [mm]	**λ_{cop}** [W/mK]	**λ_{MDF}** [W/mK]	**λ_{XPS}** [W/mK]
10	0.0054	0.1034	0.0350
20	0.0046		

Tabella 3 Conduttività termica delle cavità d'aria calcolata secondo EN ISO 6946:2008 [22].

s [mm]	**d** [mm]	**$\lambda_{Air\ Joint}$** [W/mK]	**$\lambda_{Still\ air\ VIP}$** [W/mK]	**$\lambda_{Still\ air\ Joint}$** [W/mK]
10	2.93	0.055	0.039	0.039
	4.53	0.061		
	5.62	0.063		
	8.73	0.068		
20	2.67	0.093	0.061	0.061
	3.47	0.111		
	5.60	0.12		
	6.67	0.123		

RISULTATI PER GIUNTI D'ARIA

La principale caratteristica che influenza il comportamento termico dei VIP assemblati risulta essere la larghezza di giunto (d), per questo motivo quattro diverse larghezze di giunto sono state analizzate per i tre differenti spessori di pannello, le configurazioni di giunto sono state nominate come di seguito:

- "Best case" giunti molto sottili (difficilmente realizzabili in cantiere);
- "Realistic case" giunti di larghezza media (mediamente realizzabili in cantiere);
- "Worst case 01" giunti larghi (giunti realizzati in maniera poco accurata);
- "Worst case 02" giunti molto larghi (principalmente dovuti ad errori di installazione).

La relazione tra la larghezza di giunto d e la trasmittanza termica lineica del ponte termico ψ, è stata analizzata per ciascuno spessore di pannello. In
Tabella 4 sono riportati i risultati delle analisi numerico-sperimenali per VIP assemblati con giunto d'aria, mentre in Figura 2-21 è stata riportata l'influenza della larghezza di giunto (d) sulla trasmittanza termica lineica del ponte termico ψ.

Tabella 4.Influenza della larghezza di giunto sulla conduttività termica equivalente λ_{eq} e sulla trasmittanza termica lineica ψ . Per pannelli VIP di spessore 10 e 20mm..

s [mm]	Air joint analysed	d [mm]	$\lambda_{Air\ Joint}$ [W/mK]	$R_{Air\ Joint}$ [W/mK]	$\lambda_{eq,EXP}$ [W/mK]	ψ_{EXP} [W/mK]	$\lambda_{eq,FEM}$ [W/mK]	ψ_{FEM} [W/mK]
10	Best Case	2.93	0.0550	0.1818	0.0065	**0.0282**	0.0068	**0.0362**
	Realistic Case	4.53	0.0610	0.1639	0.0066	**0.0319**	0.0072	**0.0468**
	Worst Case 01	5.62	0.0630	0.1587	0.0069	**0.0382**	0.0075	**0.0537**
	Worst Case 02	8.73	0.0680	0.1471	0.0075	**0.0551**	0.0083	**0.0743**
20	Best Case	2.67	0.0930	0.2151	0.0066	**0.0255**	0.0065	**0.0236**
	Realistic Case	3.47	0.1110	0.1802	0.0069	**0.0284**	0.0069	**0.0284**
	Worst Case 01	5.60	0.1200	0.1667	0.0077	**0.0391**	0.0079	**0.0420**
	Worst Case 02	6.67	0.1230	0.1626	0.0087	**0.0519**	0.0085	**0.0490**

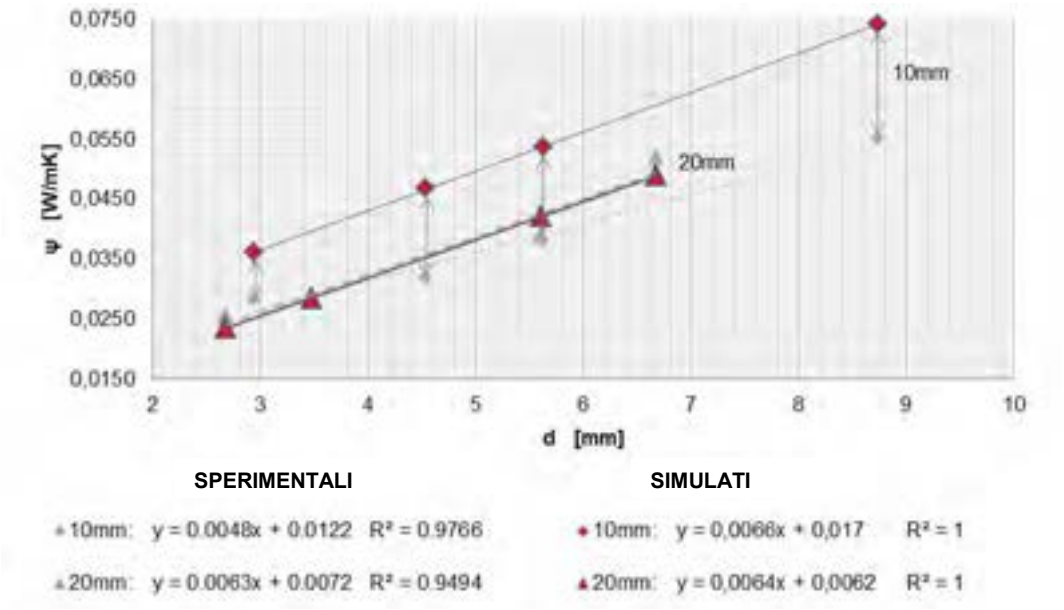

Figura 2-21. l'influenza della larghezza del giunto d'aria (d) sulla trasmittanza termica lineica del ponte termico *ψ per 10 e 20 mm di spessore*

Dalla Figura 2-21 è possibile osservare che I risultati delle simulazioni numeriche si collocano su tre rette parallele per i tre spessori simulati, considerando la stessa larghezza di giunto *d*, il valore di trasmittanza termica lineica ψ_{FEM} dipende esclusivamente dallo spessore del pannello, mentre lo scostamento tra i differenti spessori risulta essere prevalentemente costante ($\Delta\psi_{FEM}$_10-20mm=0.0108W/mK, $\Delta\psi_{FEM}$_20-30mm=0.0040W/mK and $\Delta\psi_{FEM}$_10-30mm=0.0148W/mK).
Per quanto riguarda i risultati sperimentali, è possibile osservare come questi siano distribuiti seguendo due curve, tali curve possono essere linearizzate con un buon grado di approssimazione. Tale è dovuto all'incertezza di misura sperimentale. Dai risultati sperimentali sono osservabili due differenti trends:

- Per 10mm di spessore, i risultati sperimentali risultano essere discostati rispetto a quelli ottenuti numericamente;
- Per 20mm di spessore, i risultati numerici e sperimentali risultano praticamente coincidenti.

RISULTATI PER GIUNTI STRUTTURALI

I giunti strutturali presentano come parametro termico caratterizzante, la resistenza termica R_{Joint} che dipende dallo spessore e dalla conduttività termica del materiale adoperato. I risultati delle analisi numeriche e sperimentali sono riassunti in Tabella 5 in funzione dello spessore del pannello.

Tabella 5. Giunti strutturali: risultati sperimentali.

s [mm]	Joint Material	λ_{Joint} [W/mK]	R_{Joint} [m^2K/W]	$\lambda_{eq,EXP}$ [W/mK]	ψ_{EXP} [W/mK]	$\lambda_{eq,FEM}$ [W/mK]	ψ_{FEM} [W/mK]
10	XPS	0.0350	0.2855	**0.0103**	**0.1244**	**0.0105**	**0.1305**
	MDF	0.1034	0.0967	**0.0176**	**0.3109**	**0.0198**	**0.3672**
20	XPS	0.0350	0.5709	**0.0108**	**0.0787**	**0.0101**	**0.0701**
	MDF	0.1034	0.1934	**0.0206**	**0.2031**	**0.0196**	**0.1903**

I risultati numerici e sperimentali risultano essere concordanti, presentando una differenza massima di ψ, intorno al 15% (giunti in MDF s=10mm). In Figura 2-22 sono riportati valori di trasmittanza termica lineica in funzione della resistenza termica del giunto per tutti gli spessori analizzati, i risultati sperimentali e quelli numerici sono distribuiti lungo curve pressoché coincidenti.

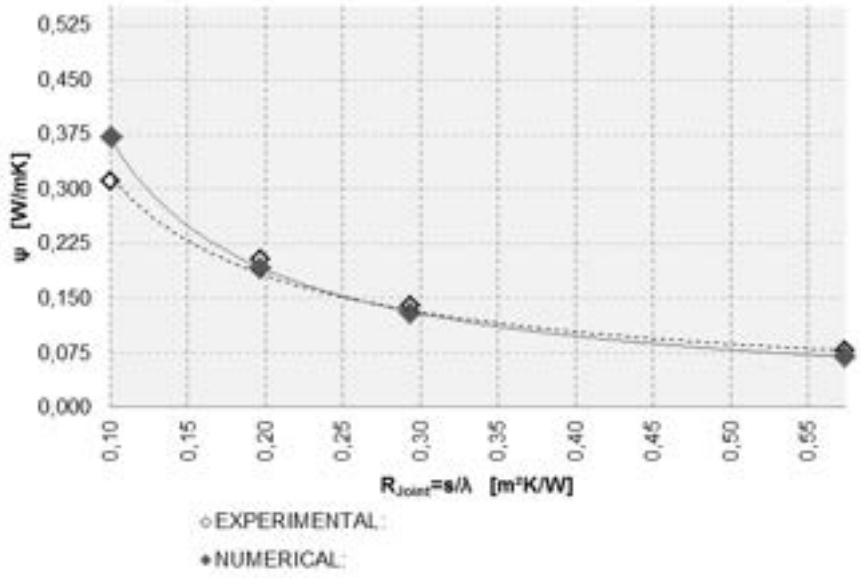

Figura 2-22. ψ in funzione di R_{joint}. Risultati numerici e sperimentali

INFLUENZA DELLA FORMA

La conduttività termica equivalente λ_{eq} presentata sopra è legata ad una dimensione di 254x254mm (area di misura del termoflussimetro). Al fine di ottenere valori di conduttività equivalente λ_{eq} maggiormente correlati alle reali dimensioni dei pannelli VIP per l'edilizia, è stata effettuata un'analisi legata al fattore di forma dei pannelli.
Il fattore di forma scelto è stato il rapporto P/A (rapporto tra semiperimetro e area del pannello). Attraverso questa analisi è stato possibile comprendere il grado di attendibilità del valore di conduttività termica fornito dai produttori di pannelli VIP $\lambda_{eq\ producer}$=0.007W/mK.
In Figura 2-23 è riportata la relazione tra la conduttività equivalente λ_{eq} ed il rapporto di forma P/A (risultati numerici e sperimentali) per pannelli di spessore s=20mm, i risultati per gli altri spessori s=10 e 20mm sono riportati in

Tabella 6 e Tabella 7.
In Figura 2-23 sono mostrati i risultati di λ_{eq} relativi al giunto d'aria per *d*= 3.47mm (Realistic Case), e i giunti strutturali in XPS, le linee indicatrici verticali rappresentano le dimensioni standard dei VIP presenti in commercio, mentre le indicatrici orizzontali rappresentano rispettivamente $\lambda_{eq\ producer}$ and λ_{cop}.

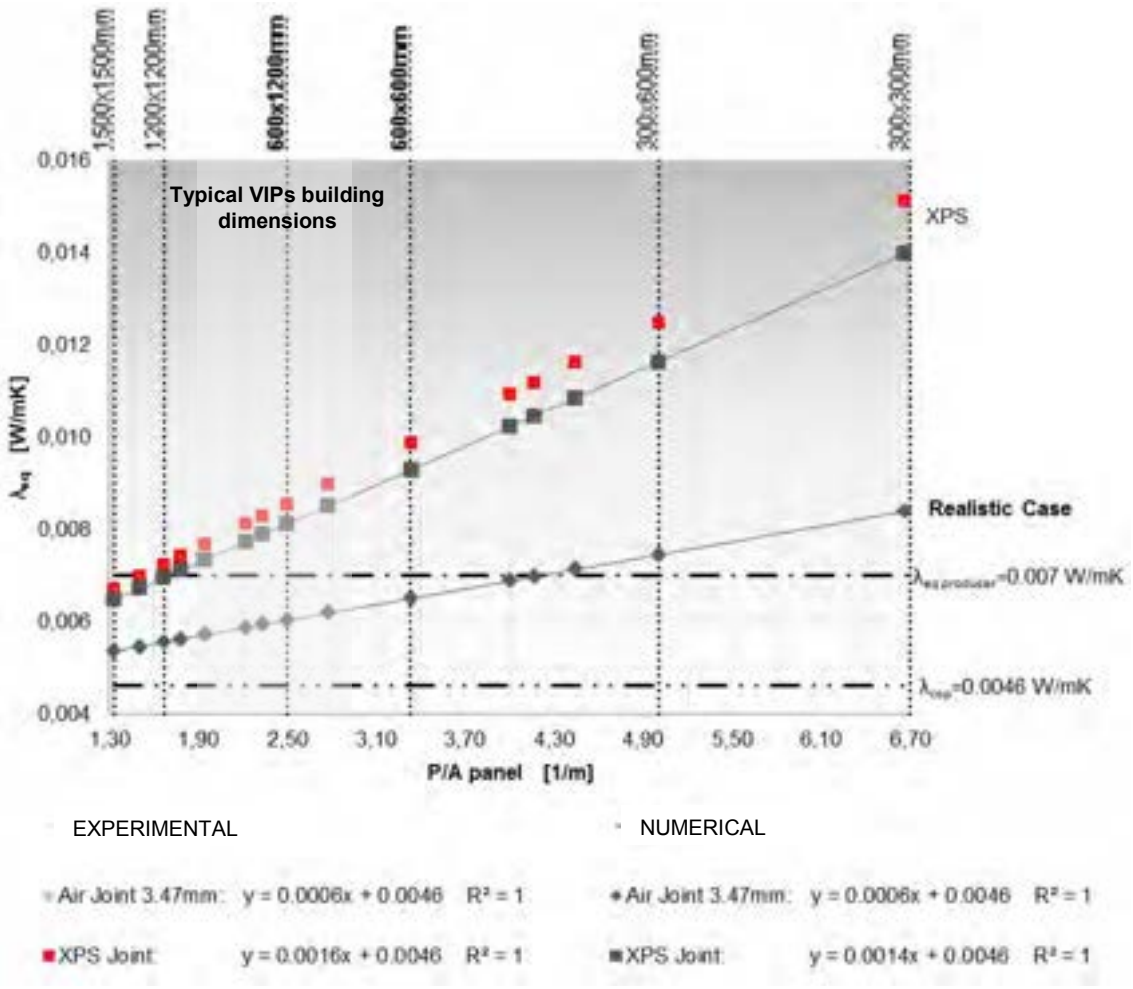

Figura 2-23. ***λ_{eq} in funzione di del fattore di forma P/A in function of panel dimensions P/A, risultati numerici e sperimentali per pannelli di spessore s=20mm.***

Osservando Figura 2-23 è possibile evidenziare come la divergenza tra risultati numerici e sperimentali sia maggiormente evidente al decrescere della dimensione dei pannelli VIP. Nel caso di giunti strutturali per *s*=20mm, la differenza di λ_{eq} tra risultati numerici e sperimentali varia dal 4% (1500x1500mm) all' 8% (300x300mm) per giunti in XPS, per quanto riguarda il caso dei giunti d'aria non si evidenziano differenze tra i risultati numerici e quelli sperimentali (come osservato nel caso della ψ i risultati numerici e sperimentali risultano molto coerenti per spessore s=20mm).
In Figura 2-23 è possibile osservare la differenza tra λ_{eq} e λ_{cop}. Tale differenza risulta non trascurabile, specialmente per i giunti strutturali. Inoltre si evidenzia come tale differenza aumenti al decrescere della dimensione del pannello anche per le dimensioni tipiche dei pannelli usati in edilizia (600x600mm e 600x1200mm).
Concludendo è possibile affermare che VIP con bassi di P/A sono caratterizzati da λ_{eq} inferiori (VIP di grandi dimensioni presentano prestazioni migliori per via di una minore incidenza dei ponti termici).

Tabella 6. Influenza della dimensione dei pannelli sulla λ_{eq}: Risultati sperimentali (in grassetto sono evidenziate le dimensioni tipiche dei VIP per applicazioni in edilizia).

			10mm			**20mm**		
			AIR JOINT	STRUCTURAL JOINT		AIR JOINT	STRUCTURAL JOINT	
Panel dimensions	**P/A**		**Realistic Case**	**XPS**	**MDF**	**Realistic Case**	**XPS**	**MDF**
[mm]	[1/m]		d=5.53mm			d=3.47mm		
300x300	6.67	$\lambda_{eq,EXP}$ [W/mK]	0.0075	0.0137	0.0261	0.0084	0.0151	0.0317
300x600	5.00		0.0070	0.0116	0.0209	0.0075	0.0125	0.0249
600x600	**3.33**		**0.0064**	**0.0095**	**0.0157**	**0.0065**	**0.0099**	**0.0182**
600x1200	**2.50**		**0.0062**	**0.0085**	**0.0131**	**0.0060**	**0.0085**	**0.0148**
1200x1200	1.67		0.0059	0.0074	0.0105	0.0056	0.0072	0.0114
1500x1500	1.33		0.0058	0.0070	0.0095	0.0054	0.0067	0.0100

Tabella 7. Influenza della dimensione dei pannelli sulla λ_{eq}: Risultati delle analisi numeriche (in grassetto sono evidenziate le dimensioni tipiche dei VIP per applicazioni in edilizia).

			10mm			**20mm**		
			AIR JOINT	STRUCTURAL JOINT		AIR JOINT	STRUCTURAL JOINT	
Panel dimensions	**P/A**		**Realistic Case**	**XPS**	**MDF**	**Realistic Case**	**XPS**	**MDF**
[mm]	[1/m]		d=5.53mm			d=3.47mm		
300x300	6.67	$\lambda_{eq,FEM}$ [W/mK]	0.0085	0.0141	0.0298	0.0084	0.0140	0.0300
300x600	5.00		0.0077	0.0119	0.0237	0.0075	0.0116	0.0236
600x600	**3.33**		**0.0069**	**0.0097**	**0.0176**	**0.0065**	**0.0093**	**0.0173**
600x1200	**2.50**		**0.0065**	**0.0086**	**0.0145**	**0.0060**	**0.0081**	**0.0141**
1200x1200	1.67		0.0061	0.0075	0.0115	0.0056	0.0070	0.0110
1500x1500	1.33		0.0060	0.0071	0.0103	0.0054	0.0065	0.0097

In

Tabella 6 e Tabella 7 è riportata la variazione di λ_{eq} in funzione dello spessore del pannello e delle sue dimensioni. Per i giunti strutturali la differenza tra risultati numerici e sperimentali è ridotta, indipendentemente dallo spessore del pannelo. Al contrario in caso di giunti d'aria l'incidenza dello spessore sulla conduttività termica equivalente risulta essere più evidente. Questo è dovuto all'incremento della conduttività termica equivalente delle cavità d'aria tra pannelli adiacenti al crescere della loro distanza. Infine un'ultima osservazione riguarda l'impiego del valore di conduttività termica proposto cautelativamente dai produttori λ_{eq} producer che può portare a sopravvalutare la prestazione dei VIP per molti dei casi analizzati (in particolare nei giunti strutturali) come mostrato in Figura 2-23.

2.7 Approfondimento C3 (Analisi dell'influenza dei ponti termici sul bilancio energetico a scala di edificio)

L'effetto dei ponti termici nei VIPs è stato successivamente valutato in termini di trasmittanza media di facciata per diverse tipologie di parete.
A tal fine è stato sviluppato un modello di calcolo empirico derivato da interpolazioni polinomiali dei risultati ottenuti numericamente.
I modelli di calcolo sono successivamente stati impiegati per determinare l'influenza dei ponti termici sul bilancio energetico dell'edificio ed in particolar modo sul coefficiente di scambio termico per trasmissione. Dai primi risultati è stato possibile evincere che l'influenza delle reali prestazioni in opera dei VIPs possono avere in determinati casi un effetto non trascurabile sul bilancio totale di energia dell'edificio.

2.7.1 Metodologia

Per poter valutare l'effetto dei ponti termici in un sistema composto da VIP accoppiati con diversi giunti, la trasmittanza termica lineica ψ e la conducibilità termica equivalente λ_{eq} sono state valutate tramite un'analisi numerica bi-dimensionale. Sulla base dei risultati ottenuti, la performance energetica di un edificio scelto come caso studio con diversi fattori di forma è stata valutata tramite una simulazione in regime stazionario.
Sono state considerate tre tipologie di involucro verticale opaco secondo la normativa UNI-TS 11300-1, in modo da analizzare le stratigrafie più diffuse: involucro pieno, involucro con intercapedine e involucro con intercapedine isolata. Un isolamento con i VIP è stato considerato per ogni tipologia di involucro, definendo due soluzioni: isolamento dall'interno o dall'esterno. Nel primo caso, il VIP è collocato nella parte interna dell'involucro esistente, seguito da uno strato di isolante generico e uno strato di finitura in cartongesso. Nel secondo caso è stato considerato un cappotto esterno, con il VIP inserito contro la faccia esterna dell'involucro esistente, seguito da uno strato di isolante generico e uno strati di finitura in intonaco.
Quattro diversi materiali sono stati considerati per formare i traversi necessari per fissare meccanicamente i VIP: pannelli di fibra a media densità (MDF), polistirene estruso (XPS), gomma naturale e materassini di aerogel. Per rendere i risultati paragonabili a quelli ottenuti in altri studi [24],[25], i giunti sono stati considerati larghi 36mm.
Riassumendo, tre tipologie di involucro sono state scelte (involucro pieno, con intercapedine e con intercapedine isolata); per ogni tipologia, due soluzioni di isolamento sono state simulate (dall'interno e dall'esterno), considerando un possibile strato di ulteriore isolamento termico avente una conducibilità termica λ=0.035 W/mK (spesso 0mm, 20mm, 40mm o 60mm). Per ogni configurazione, tre diversi spessori di VIP sono stati considerati (10mm, 20mm o 30mm), combinati con quattro possibili giunti strutturali, risultando in un totale di 288 possibili combinazioni (Figura 2-24).

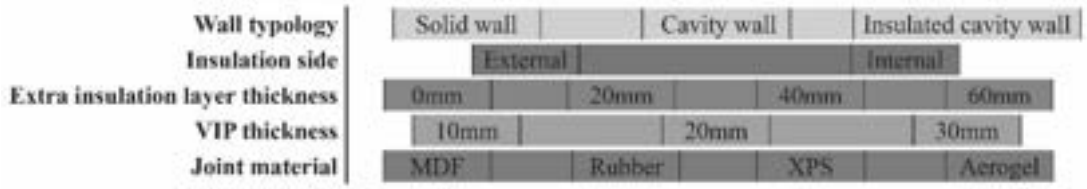

Figura 2-24. Possibili configurazioni

In questo studio, è stato considerato un VIP avente un involucro multistrato formato da uno strato di PE seguito da tre strati di PET intervallati da tre strati di alluminio (Figura 2-25).

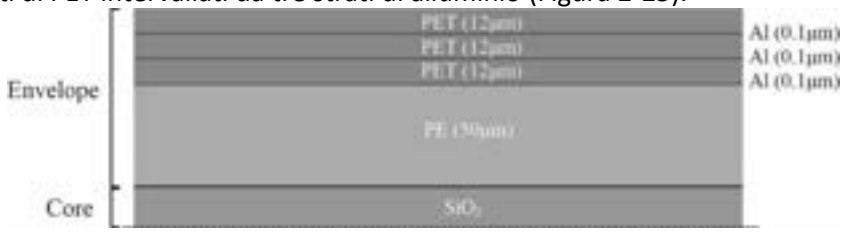

Figura 2-25. Involucro del VIP

In seguito, una campagna sperimentale tramite un termoflussimetro con anello di guardia è stata effettuata per valutare la conducibilità termica al centro dei pannelli VIP (spessi 10mm, 20mm e 30mm), che è risultata essere rispettivamente 0.00537W/mK, 0.00462W/mK e 0.00479W/mK. La stessa procedura è stata portata a termine per i giunti strutturali (Tabella 8). La conducibilità termica dell'aerogel è stata considerata pari alla media di quanto dichiarato dai produttori.

Tabella 8. Conducibilità termiche dei giunti strutturali

Joint material	*λ (W/mK)*
MDF	0.103
XPS	0.035
Rubber	0.205
Aerogel	0.015

MODELLO NUMERICO

L'analisi numerica bidimensionale è stata eseguita con il software Physibel BISCO. La mesh è stata costruita usando la triangolazione di Delaunay e successivamente sono stati calcolati i flussi termici bidimensionali in regime stazionario utilizzando il metodo del bilancio energetico. Sono state effettuate alcune semplificazioni per rendere le analisi numeriche più veloci senza compromettere l'accuratezza del risultato. A questo proposito, l'involucro multistrato del VIP è stato considerato mono strato e modellato come in [24] e [25]; lo stesso è stato fatto per gli strati che si trovano da ciascun lato del VIP (Figura 2-26). Per fare in modo che la resistenza termica degli strati appena citati rimanga invariata, a questi sono state attribuite delle conducibilità termiche fittizie calcolate attraverso la seguente equazione:

$$\lambda_{fict,x} = \frac{d_x}{R_x} = \frac{d_x}{\sum_{j=1}^{n} R_{xj}}$$

dove R_{xj} sono le resistenze termiche di tutti gli strati (j) e d_x è lo spessore del singolo strato.
Questa procedura è stata eseguita sia per lo strato esterno che per quello interno, risultando in due conducibilità termiche fittizie.

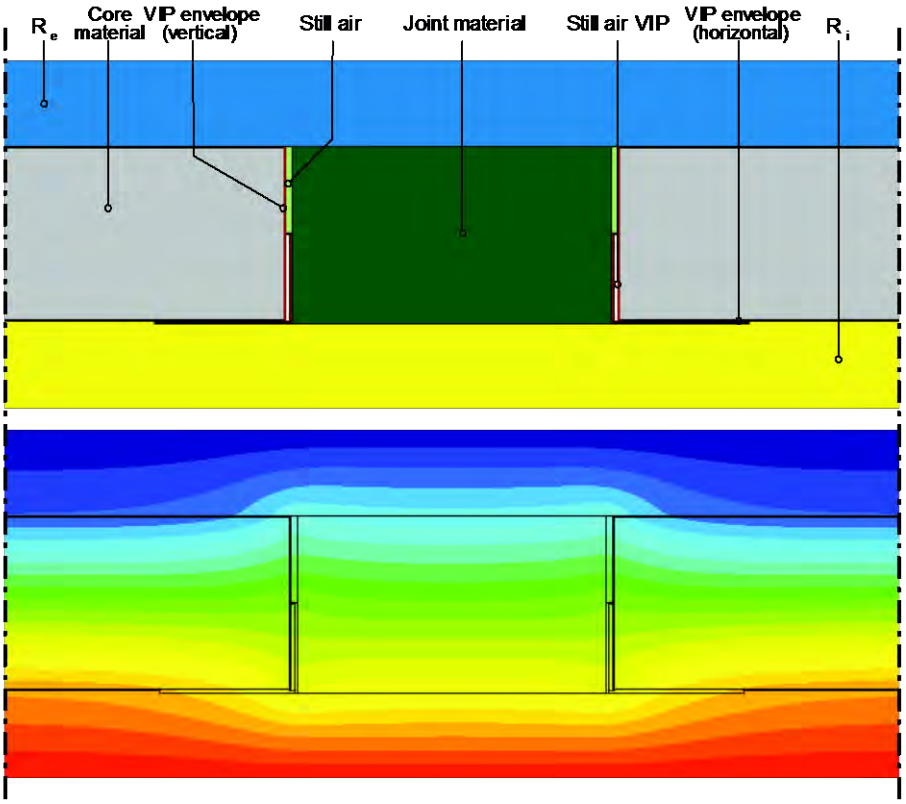

Figura 2-26. Modello di input (in alto) e output grafico tramite rappresentazione delle isoterme (in basso)

Come output, BISCO fornisce i valori di flusso termico temperatura. Quindi, la trasmittanza termica lineica è stata calcolata utilizzando la seguente equazione [23]:

$$\psi = \frac{\dot{Q} - \frac{1}{R_{TOT}} \cdot l \cdot \Delta\vartheta}{\Delta\vartheta}$$

Dove:

$$\frac{1}{R_{TOT}} = \frac{1}{R_i + R_e + \frac{d}{\lambda_{COP}}}$$

La trasmittanza termica equivalente è stata poi calcolata con la seguente equazione:

$$\lambda_{eq} = \lambda_{COP} + \psi \cdot d \cdot \frac{P}{A}$$

λ_{eq} dipende dalla dimensione del pannello, in particolare dal semi-perimetro P e dall'area A. In questo studio è stato considerato un pannello di dimensioni standard e commercialmente diffuso (500x600mm).

Un edificio residenziale è stato scelto come caso studio, calcolandone le performance energetiche al variare di tutte le configurazioni di involucro possibili. Le condizioni al contorno sono le seguenti:

- Luogo: Torino;
- Gradi Giorno=2617;
- Periodo di riscaldamento: 15 Ottobre – 15 Aprile;
- Temperatura interna= 20°C (293.15K);
- Dimensioni interne: 5x5x2.7m (Figura 2-27);
- Dimensioni della finestra: 1/8 della superficie in pianta (minima superficie aeroilluminante secondo [26]);
- U_w=2W/m^{2}K;
- Ventilazione: solo naturale (0. 3h^{-1});
- Solai adiabatici.

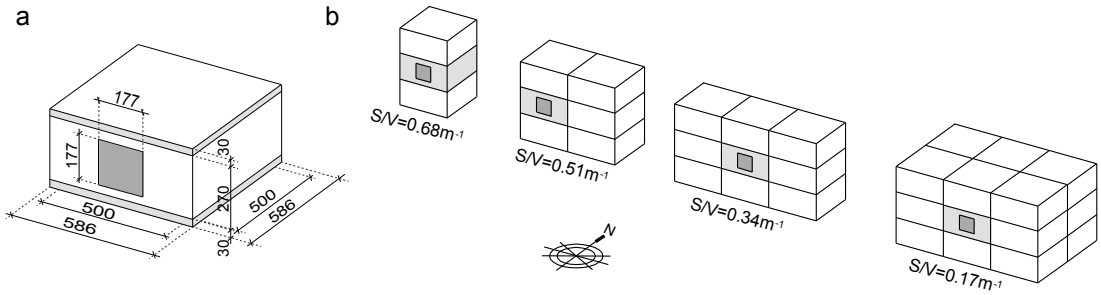

Figura 2-27. (a) modello 3D dell'edificio caso studio (quote in cm); (b) Vista assonometrica dei quattro casi: da zero a tre muri adiabatici

Per tener conto di diversi fattori di forma, la performance energetica dell'edificio è stata calcolata considerando quattro configurazioni (Figura 2-27 (b)):

- Quattro muri esterni;
- Tre muri esterni e uno adiabatico;
- Due muri esterni e due adiabatici;
- Un muro esterno e tre adiabatici.

Per valutare l'influenza dei ponti termici, le seguenti analisi sono state effettuate:

- Considerando la λ_{eq} come conducibilità termica del pannello VIP, che tiene in conto dei ponti termici valutati con l'analisi numerica 2D sopra descritta;
- Considerando la conducibilità termica fornita dal produttore λ_{eq}=0.007W/mK, che tiene conto dei ponti termici in maniera semplificata;
- Considerando la conducibilità termica al "centro del pannello" (Center Of Panel) λ_{COP}, che non tiene conto di nessun ponte termico.

Per valutare la performance energetica dell'edificio in questione sono stati considerati tre parametri, secondo quanto indicato in [27]:

- H_{tr}: coefficiente di scambio termico per trasmissione;
- Q_{Htr}: scambio termico per trasmissione;
- Q_H: fabbisogno ideale di energia termica dell'edificio.

In questo modo i risultati consentono di valutare l'influenza dei ponti termici relativi al sistema VIP-giunti strutturali sulla performance energetica dell'edificio. Per isolare l'effetto dei ponti termici dovuti ai VIP sulla performance energetica dell'edificio, non sono stati presi in considerazione altre tipologie di ponti termici.

2.7.2 Risultati

La trasmittanza termica lineica e la conducibilità termica equivalente sono state valutate per tutte e configurazioni di involucro e con i metodi descritti in precedenza. Per ragioni di brevità in Figura 2-28 è mostrata la variazione di trasmittanza termica lineica relativa alla configurazione con VIP spesso 30mm al variare della resistenza termica totale degli strati che si trovano da ciascun lato del VIP. Le differenze percentuali tra la conducibilità termica equivalente e quella al centro del pannello sono state calcolate in modo da poter valutare l'influenza dei ponti termici.
La performance energetica dell'edificio caso studio è stata valutata attraverso una simulazione in condizioni stazionarie e i risultati relativi ad una certa configurazione sono mostrati (in particolar modo il fabbisogno energetico al variare dei fattori di forma). Qualche considerazione è stata fatta in merito alla valutazione del coefficiente di scambio termico per trasmissione per diverse conducibilità termiche (λ_{COP}, λ_{pro} o λ_{eq}).

TRASMITTANZA TERMICA LINEICA E CONDUCIBILITÀ TERMICA EQUIVALENTE

In Figura 2-28 è rappresentata la variazione di trasmittanza termica lineica in funzione della resistenza termica degli strati che si trovano da ciascun lato del VIP (R_i+R_e) nel caso di VIP spesso 30mm. Spostandosi da sinistra verso destra lungo l'asse delle ascisse (R_i+R_e), la trasmittanza termica lineica ψ, per le diverse configurazioni di involucro, tende a convergere ad un piccolo range di valori.
Fissando un valore basso di R_i+R_e, per esempio 1 m^2K/W (equivalente grosso modo ad un involucro con intercapedine), il range di trasmittanze termiche lineiche per le varie configurazioni varia da 0.013 a 0.037W/mK (linea tratteggiata in Figura 2-28). Considerando un valore maggiore di R_i+R_e (involucro con intercapedine isolata da uno strato di isolante spesso 40mm), il valore di ψ varia da 0.008 a 0.018W/mK (linea a puntini in Figura 2-28).
Una diminuzione del valore di ψ può essere osservato all'aumentare di R_i+R_e. Questo comportamento sottolinea che più alti sono i valori di resistenza termica degli strati da ciascun lato del VIP, più bassa sarà l'entità dei ponti termici. Per meglio approssimare la tendenza della trasmittanza termica lineica, è stata calcolata una curva interpolante polinomiale di quarto grado.
Un importante conclusione che si può trarre da questi risultati è che l'aerogel mostra ottime performance per impieghi come giunto strutturale nei VIP. I giunti sono di fondamentale importanza, dato che possono essere utilizzati come traversi utili al fissaggio meccanico dei VIP in involucri verticali o per fornire una certa flessibilità dimensionale (per esempio in corrispondenza degli angoli o delle discontinuità).

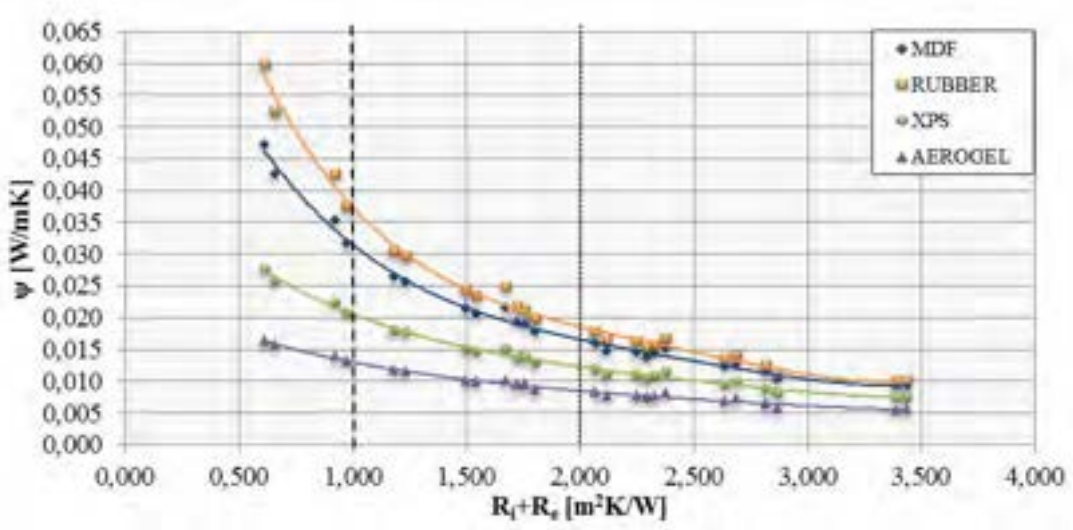

Figura 2-28. Trasmittanza termica lineica (ψ)

Le differenze percentuale tra λ_{eq} e λ_{COP} sono state calcolate per effettuare altre considerazioni riguardo l'influenza dei ponti termici. I risultati derivanti da questa analisi consentono di isolare l'effetto dei ponti termici e di capire la loro influenza nella conducibilità termica equivalente del materiale isolante in

questione (VIP in questo caso). Un pannello di dimensioni 500x600mm è stato considerato, e i risultati sono mostrati in Figura 2-29.
I valori di resistenza termica totale degli strati che si trovano da ciascun lato del VIP sono rappresentativi di configurazioni di involucri edilizi realistiche (data la loro diffusione nel territorio) e coprono un range piuttosto ampio (in quanto valori al di fuori di questo range rappresentano delle rare eccezioni).

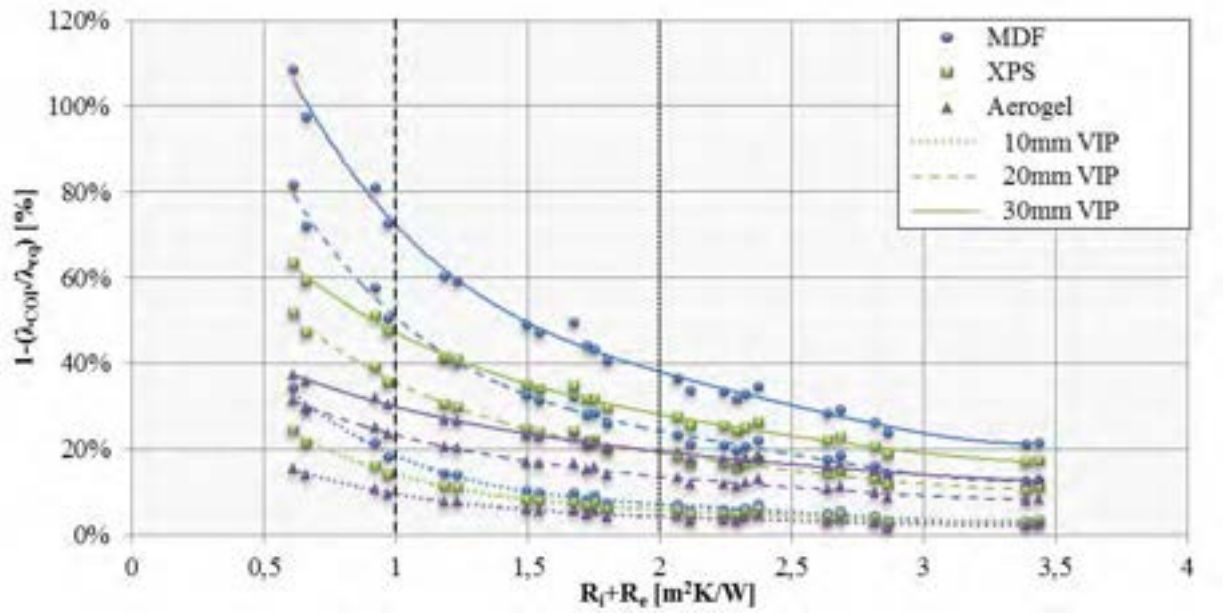

Figura 2-29. Differenza percentuale tra diverse conducibilità termiche

In Figura 2-29, per R_i+R_e = 1 m^{2}K/W (linea verticale tratteggiata), la differenza percentuale tra λ_{eq} e λ_{COP} varia dal 10% a 75%; per R_i+R_e = 2 m^{2}K/W (linea verticale a puntini), la differenza percentuale varia dal 4% al 36%. Questo indica che più alti sono i valori di resistenza termica degli strati da ciascun lato del VIP, più è bassa la variazione di differenza percentuale tra le due conducibilità termiche.
Si può osservare una separazione in tre gruppi: le curve relative ai VIP spessi 30mm si trovano in alto, quelle relative ai VIP 20mm al centro e quelle relative ai VIP 10mm in basso. Ciò è vero per un dato materiale, dato che i comportamenti termici estremamente diversi dei vari materiali fanno sì che le curve si incrocino a vicenda.
Aumentando lo spessore del VIP, incrementa anche la variazione tra il valore minimo e il valore massimo di differenza percentuale. Per esempio, considerando il giunto in XPS, per il VIP 30mm la variazione è del 46%, per il VIP 20mm del 41% e per il VIP 10mm del 21%.
Un comportamento analogo si riscontra osservando la variazione di differenza percentuale tra il VIP più sottile e quello più spesso considerando prima un basso e poi un alto valore di R_i+R_e. Per esempio, considerando il giunto in MDF, la variazione è pari al 74% nel caso di basso R_i+R_e (0,612 m^{2}K/W), mentre è del 17% per un alto R_i+R_e (3,437 m^{2}K/W).

PERFORMANCE ENERGETICA DELL'EDIFICIO

La performance energetica di un edificio caso studio è stata valutata al variare delle configurazioni di involucro edilizio precedentemente illustrate. Il fabbisogno energetico Q_H per metro quadro (normalizzato rispetto alla superficie netta di pavimento) è rappresentato in funzione dei fattori di forma in Figura 2-30, considerando per ragioni di brevità solo i risultati relativi a isolamento dall'interno in un involucro pieno con 20mm di strato isolante addizionale.
Per valutare l'influenza del ponte termico su H_{tr} (coefficiente di scambio termico per trasmissione), sono state quantificate le differenze percentuali tra il calcolo di questo parametro utilizzando λ_{COP} o λ_{pro} piuttosto che λ_{eq}. Questo è stato fatto per VIP da 20mm, giunto in XPS e per tutti i fattori di forma (Figura 2-31 e Figura 2-32).

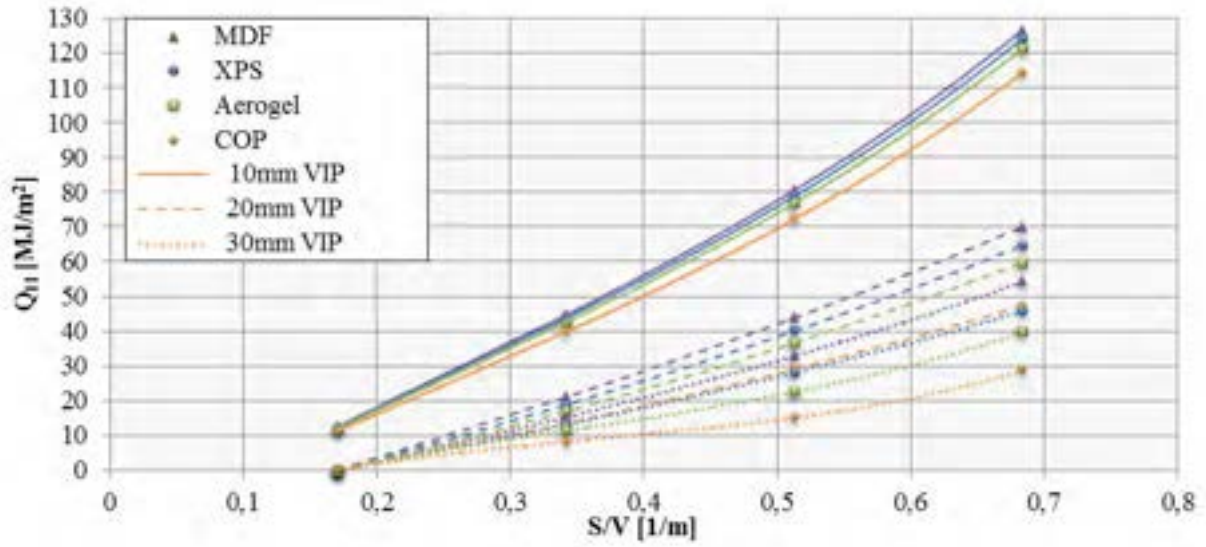

Figura 2-30. Variazione di Q_H per diversi spessori di VIP e diversi fattori di forma (R_i+R_e=1,232m²K/W)

Osservando Figura 2-30 è chiaro che la tipologia di giunto non influisce in modo significativo il parametro Q_H per VIP spessi 10mm (vedi linee continue nella parte superiore del grafico). Al contrario, per VIP spessi 20mm e 30 mm, la tipologia di giunto ha un'influenza significativa. Secondo queste conclusioni, maggiore lo spessore del VIP (e conseguentemente la sua resistenza termica), maggiore l'influenza dei ponti termici.

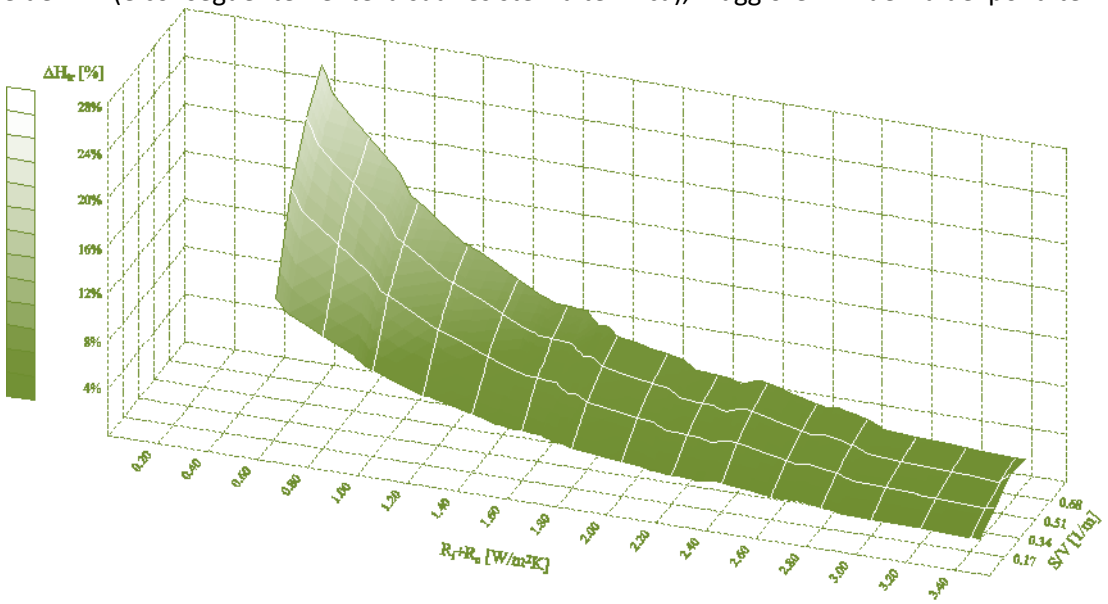

Figura 2-31. Differenza percentuale tra H_{tr} calcolato con λ_{eq} e λ_{COP} – giunto in XPS

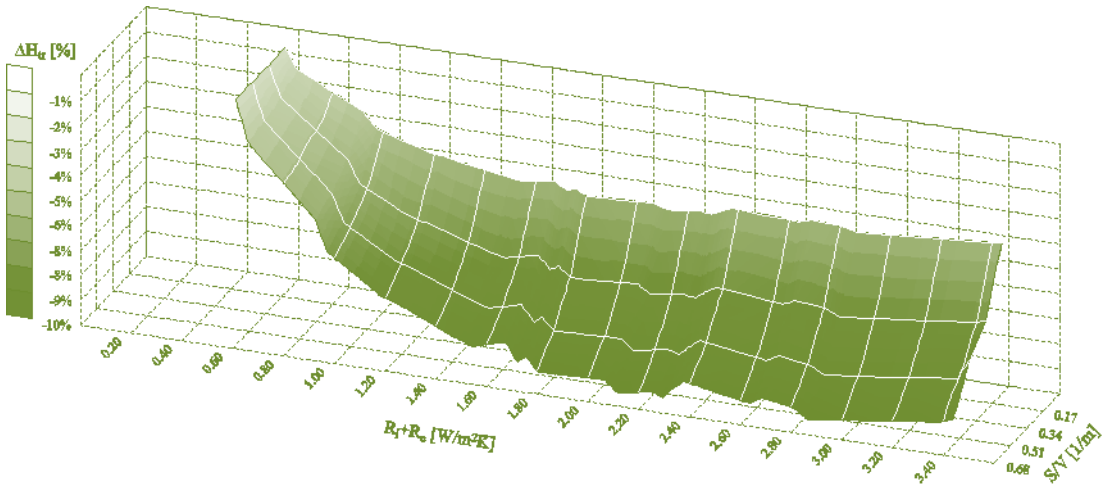

Figura 2-32. Differenza percentuale tra H_{tr} calcolato con λ_{eq} e λ_{pro} – giunto in XPS

Figura 2-31 mostra la differenza percentuale tra H_{tr} calcolato con λ_{COP} e lo stesso coefficiente calcolato con λ_{eq}. Questo è stato effettuato per VIP da 20mm con giunti in XPS. Tutti i valori di differenza percentuali sono positivi perché λ_{eq} è sempre più alto di λ_{COP}, dato che tiene conto dei ponti termici. La differenza percentuale aumenta al decrescere della resistenza termica degli strati che si trovano da ciascun lato del VIP e all'aumentare del fattore di forma. Anche se le differenze percentuali raggiungono bassi valori per alti R_i+R_e, non possono mai considerarsi trascurabili.

Figura 2-32 mostra un andamento simile al precedente, con la principale differenza che le differenze percentuali sono quelle tra H_{tr} calcolato con λ_{pro} piuttosto che λ_{eq}. In questo caso, tutti i valori sono negativi, dato che λ_{pro} è sempre più alto di λ_{eq}, traendo la conclusione che i produttori sottostimano la reale performance del loro prodotto. Le differenze percentuali non sono mai trascurabili, come nel precedente caso.

Dalle precedenti analisi si può stabilire che l'effetto dei ponti termici nei VIP influisce notevolmente sul coefficiente di scambio termico per trasmissione H_{tr}. Escludendo il giunto in gomma, le differenze percentuali possono raggiungere valori fino al 51% (nel caso di isolamento dall'esterno in un involucro pieno, utilizzando 30mm di VIP con giunti in MDF).

3 Conclusioni

3.1 Attività A

L'attività condotta dal gruppo di ricerca sul tema definizione della valutazione sui consumi energetici dei comportamenti dell'utenza, si è delineata mediante uno studio teorico ed empirico sull'incertezza della valutazione del consumo energetico dovuta al comportamento degli occupanti in edifici residenziali. Lo scopo principale di questa ricerca è quello di proporre una metodologia per modellare e simulare il comportamento dell'utente nel contesto dei consumi energetici reali, connessa alla sua applicazione dei casi di studio. La metodologia si delinea con uno spostamento verso una modellazione probabilistica del comportamento degli occupanti relativo al controllo dell'ambiente interno: l'obiettivo è quello di determinare modelli di comportamento degli utenti capaci di descrivere l'interazione con l'edificio e i sistemi.
La procedura proposta viene quindi applicata a dei casi di studio: vengono definiti dei modelli di comportamento degli occupanti relativi all'uso delle finestre e all'uso del termostato in ambito residenziale e in edifici adibiti a terziario. In parallelo si è quindi indagata l'influenza di differenti livelli d'interazione con i principali sistemi di controllo delle condizioni climatiche e ambientali a disposizione degli utenti, sul livello di comfort termico e dunque sui consumi energetici per il riscaldamento. Profili comportamentali per utenti Attivi, Medi, Passivi sono stati implementati secondo passaggi logici incrementali al fine di ottenere la più accurata riproduzione possibile dell'interazione dell'utente con i sistemi di controllo e l'involucro edilizio. Seguendo tale approccio, la ricerca qui presentata ha evidenziato quale combinazione di profilo comportamentale di utente sia il più "energy-waster" o "energy-saver" nell'ambito degli edifici residenziali.
Nel complesso, lo studio condotto sottolinea l'importanza di indagare e descrivere il comportamento dell'individuo legato all'interazione con edifici e sistemi, al fine di comprendere le differenze nei consumi di energia reali degli edifici. In sintesi, il valore aggiunto dell'attività svolta rispetto allo stato dell'arte, si delinea attraverso l'identificazione della complessità e multidisciplinarità del tema con una profonda conoscenza della natura, logica, tipologia del comportamento dell'utente legato all'uso di energia negli edifici e la proposta di un inquadramento comune di lavoro tra scienze tecniche e scienze sociali. Inoltre, il vero punto di innovazione della ricerca sul comportamento dell'utente legato all'uso dell'energia, è stato lo sviluppo di una metodologia per modellare e simulare il comportamento "energetico" dell'utente al fine di ottenere una previsione più accurata delle prestazioni energetiche e ambientali degli edifici.
Infine, è da sottolineare come nonostante l'applicazione descritta in questa attività sia limitata per la maggior parte all'analisi delle azioni dell'utente nell'ambito residenziale, il metodo presentato può essere applicato anche ad altri tipi di azioni comportamentali in edifici per uffici.

3.2 Attività B

L'attività del gruppo TEBE all'interno della Subtask A di definizione di un modello di edificio di riferimento da utilizzare per la valutazione di nuove soluzioni impiantistiche è stata consolidata. Il modello dell'edificio è stato validato attraverso il confronto dei modelli termoenergetici creati con diversi software di simulazione energetica. L'obiettivo perseguito nella creazione di tale modello è stato l'utilizzo dello stesso per la definizione di un sistema impiantistico di riferimento da mettere a confronto con soluzioni impiantistiche differenti.
L'attività di ricerca del Subtask D ha permesso di approfondire diversi aspetti riguardanti lo sviluppo di un sistema di produzione di calore innovativo e proveniente da una fonte energetica rinnovabile. In particolare, i dati ottenuti dalle simulazioni sul rendimento di tale tecnologia risultano essere molto promettenti e le prime evidenze sperimentali hanno portato a confermare questi dati, aggiungendo però anche alcune problematiche legate al fenomeno denominato creaming.

La ricerca è stata divisa in due parti: la prima legata ad un approfondimento sulle proprietà termofisiche del materiale ha comportato a calcolare l'entalpia specifica del mPCS per diverse concentrazioni e alla costruzione di un modello fisico in grado di predire il fenomeno di creaming. L'elevata qualità del lavoro svolto è dimostrata dalla pubblicazione di due articoli sulla rivista Energy Procedia.
La seconda parte dell'attività sperimentale è consistita nella realizzazione di monitoraggi su un dimostratore in scala reale di un sistema solare termico alimentato a mPCS. In una prima fase ci si è concentrati sul debug dell'apparato di controllo e sulla costruzione di un caso di riferimento attraverso dei test condotti su un pannello ad acqua glicolata. L'ultimo periodo dell'attività ha portato a monitorare un pannello alimentato a mPCS con una concentrazione del 10 % di microcapsule ed è tuttora in corso. Futuri esperimenti consentiranno di valutare il funzionamento del pannello a concentrazioni diverse ed in presenza di differenti condizioni al contorno. Ulteriori soluzioni per arginare il problema di creaming sono necessarie.

3.3 Attività C

I materiali superisolanti ed in particolar modo i Vacuum Insulation Panels VIPs presentano elevate prestazioni termoisolanti e risultano essere un'interessante soluzione di isolamento termico in particolare negli elementi edilizi in cui l'obbiettivo è quello di isolare minimizzando gli spessori.
Tuttavia una serie di criticità e la scarsa conoscenza del reale comportamento di questi materiali e delle loro prestazioni in fase di esercizio ne costituisce un barriera al loro sviluppo. L'obbiettivo del lavoro di ricerca presentato è finalizzato a comprendere meglio le reali prestazioni di questi materiali quando realmente applicati agli edifici.
Sulla base dell'esperienza di ricerca si mette in evidenza come:

- La caratterizzazione sperimentale dei Vacuum Insulation Panels VIP richieda condizioni di prova diverse rispetto ai materiali isolanti tradizionali e che l'incertezza di misura risulta fortemente influenzata dalla differenza di temperatura generata tra le piastre:
  - Per la conduttività termica al centro del pannello, si raccomandano test con differenze di temperatura tra le piastre tali da generare un flusso termico non inferiore a 2.35 W/m^2 per ottenere valori di incertezza accettabili (minori del 3%);
- La conduttività termica dei VIP risulta fortemente influenzata dalla temperatura di esercizio, pertanto:
  - Il valore di conduttività termica da utilizzarsi al fine dei calcoli energetici dovrebbe essere misurato in condizioni di temperatura di prova analoghe alle condizioni reali di esercizio;
  - Una caratterizzazione più completa della conduttività termica dovrebbe prevedere almeno tre punti di misura a tre diverse temperature medie;
- I ponti termici nei VIP hanno un effetto non trascurabile sul comportamento termico globale dell'edificio:
  - Considerando le reali condizioni di utilizzo, la differenza tra la conduttività termica misurata al centro del pannello e quella equivalente di calcolo (tenendo conto dei ponti termici) può variare dal 2% al 110% circa.
  - Nel calcolo del fabbisogno di energia degli edifici, i ponti termici dovrebbero essere accuratamente computati. Dai risultati ottenuti si evince come a scala di edificio il coefficiente di scambio termico per trasmissione H_{TR} può aumentare dal 4% al 50% a seconda del tipo di giunto strutturale impiegato.

Grazie alle analisi svolte è stato possibile stilare una serie di linee guida relative all'installazione dei VIP finalizzate a ridurre il decadimento prestazionale causato dai ponti termici, in particolare:

- L'effetto dei ponti termici nei giunti si riduce notevolmente nel caso dell'aggiunta di strati isolanti addizionali, diventando quasi trascurabile con valori di resistenza (R_i+R_e > 2 m^2K/W);

- Il semplice accostamento tra pannelli è sempre consigliato per minimizzare l'effetto dei ponti termici, tuttavia nel caso di installazione su pareti verticali o soffitti, si consiglia l'uso di giunti strutturali ad elevata resistenza termica;
- In assenza di giunti strutturali verificare che nell'accostamento tra pannelli si minimizzi la dimensione del giunto d'aria;
- Ove possibile, l'impiego di VIP di dimensioni maggiori consente di ottenere migliori risultati di trasmittanza termica media dell'elemento edilizio oggetto di intervento.

4 Riferimenti bibliografici

4.1 Attività A

1. IEA – EBC Annex 66. “Definition and simulation of occupant behavior in buildings”. 2014-2017.
2. Haldi F., Robinson D., Interactions with window openings by office occupants, Building and Environment 44 (2009) 2378-2395.
3. Schweiker M., Shukuya M., Comparison of theoretical and statistical models of air-conditioning-usage behavior in a residential setting under Japanese climatic conditions, Building and Environment 44 (2009) 2137-2149.
4. Nicol J.F., Humphreys M., A Stochastic Approach to Thermal Comfort-Occupant Behavior and Energy Use in Buildings, ASHRAE Transactions 110(2):554-568 (2004).
5. D’Oca S., Hong T., A data-mining approach to discover patterns of window opening and closing behavior in offices, Building and Environment 2014.
6. Fabi V., Andersen RK, Corgnati SP, Validation of models of users' window opening behaviour in-residential buildings, Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association pp. 2028-2035.
7. Fabi, V., Andersen, R.V., Corgnati, S., Olesen, B.W., Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models, Building and environment 2012.

4.2 Attività B

1. Youssef, Z., Delahaye, A., Huang, L., Trinquet, F., Fournaison, L., Pollerberg, C., Doetsch, C. (2013). State of the art on phase change material slurries. Energy Conversion and Management, 65, 120-132.
2. Delgado, M., Lázaro, A., Mazo, J., Zalba, B. (2012). Review on phase change material emulsions and microencapsulated phase change material slurries: materials, heat transfer studies and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(1), 253-273.
3. Bugaje, I. M. (1997). Enhancing the thermal response of latent heat storage systems. International journal of energy research, 21(9), 759-766.
4. Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and Sustainable energy reviews, 13(2), 318-345.
5. Serale, G., Baronetto, S., Goia, F., Perino, M., Characterization and Energy Performance of a Slurry PCM-based Solar Thermal Collector: A Numerical Analysis, in Proceedings of SHC, Freiburg, Germany, 23-25 September 2013.
6. Baronetto S., Serale G., Goia F., Perino M., Numerical model of a Slurry PCM based solar Thermal collector, in: Lecture Notes in Electrical Engineering, volume 263, 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, XI'an (China) University of Architecture and Technology, 19-21 October 2013. pp. 13-20.
7. Delgado, M., Lázaro, A., Peñalosa, C., Mazo, J., Zalba, B. (2013). Analysis of the physical stability of PCM slurries. International Journal of Refrigeration, 36(6), 1648-1656.
8. Serale, G., Cascone Y., Capozzoli A., Fabrizio E., Perino M., Potentialities of a low temperature solar heating system based on slurry phase change materials (PCS) in Proceedings of SEB2014 and Energy Procedia.
9. Delgado, M., Lázaro, A., Mazo, J., Marín, J. M., Zalba, B. (2012). Experimental analysis of a microencapsulated PCM slurry as thermal storage system and as heat transfer fluid in laminar flow. Applied Thermal Engineering, 36, 370-377.

10. Kousksou, T., Bruel, P., Cherreau, G., Leoussoff, V., & El Rhafiki, T. (2011). PCM storage for solar DHW: From an unfulfilled promise to a real benefit. Solar Energy, 85(9), 2033–2040. doi:10.1016/j.solener.2011.05.012
11. Haillot, D., Franquet, E., Gibout, S., & Bédécarrats, J.-P. (2013). Optimization of solar DHW system including PCM media. Applied Energy, 109, 470–475. doi:10.1016/j.apenergy.2012.09.062
12. Rabin, Y., Bar-Niv, I., Korin, E., & Mikic, B. (1995). Integrated solar collector storage system based on a salt-hydrate phase-change material. Solar Energy, 55(6), 435-444.
13. H. Mehling e L. F. Cabeza, «T-history method,» in Heat and cold storage with PCM, Springer, 2008, pp. 80-84.
14. H. Hong, S. K. Kim e Y.-S. Kim, «Accuracy improvement of T-history method fpr measuring heat of fusion of various materials,» International Journal of Refrigeration, vol. 27, n. 4, pp. 360-366, 2004.
15. A. Solé, L. Mirò, C. Barreneche, I. Martorell e L. F. Cabeza, «Review of the T-history method to determine thermophysical properties of phase change materials (PCM),» Renewable and Sustainable Energy Reviews , vol. 26, pp. 425-436, 2013.
16. G. Buttita, G. Serale, Y. Cascone. Enthalpy-temperature evaluation of slurry phase change materials with T-history method Energy procedia (in stampa – ALLEGATO AL REPORT)
17. F. Xueliang, G. Serale, A. Capozzoli, M. Perino. Experimental measurement and numerical modeling of the creaming of mPCM slurry, Energy procedia (in stampa – ALLEGATO AL REPORT)
18. Serale, G., Fabrizio, E., & Perino, M. (2015). Design of a low-temperature solar heating system based on a slurry Phase Change Material (PCS). Energy and Buildings.
19. Reference Buildings at the Department of Energy (DOE) website - http://www1.eere.energy.gov/buildings/commercial/ref_buildings.html.
20. European standard EN15232 : 2007 on “Energy Efficiency in buildings – Influence of Building Automation and Control and Building Management

4.3 Attività C

1. Wakili KG, Bundi R, Binder B. Effective thermal conductivity of vacuum insulation panels. Building Research & Information, 2004, 32(4):293–9.
2. Alam M, Singh H, Limbachiya MC. Vacuum Insulation Panels (VIPs) for building construction industry – A review of the contemporary developments and future directions. Applied Energy, Elsevier Ltd, 2011, 88(11):3592–602
3. H. Simmler, S. Brunner, Vacuum insulation panels for building application. Basic properties, aging mechanisms and service life, Energy and Buildings 37 (2005) 1122–1131.
4. J.-S. Kwon, C.H. Jang, H. Jung, T.-H. Song, Effective thermal conductivity of various filling materials for vacuum insulation panels, International Journal of Heat and Mass Transfer 52 (2009) 5525–5532.
5. K. Ghazi Wakili , R. Bundi, B. Binder, Effective thermal conductivity of vacuum insulation panels, Building Research & Information 32:4 (2004) 293-299.
6. T. Nussbaumer, R. Bundi, Ch. Tanner, H. Muehlebach, Thermal Analysis of a wooden door system with integrated vacuum insulation panels, Energy and Buildings 37 (2005) 1107–1113.
7. T. Nussbaumer, K. Ghazi Wakili, Ch. Tanner, Experimental and numerical investigation of the thermal performance of a protected vacuum-insulation system applied to a concrete wall, Applied Energy 83 (2006) 841–855.
8. R. Beatens, B.P. Jelle, J.V. Thue, M.J. Tenperik, S. Grynning, S. Uvsløkk, A. Gustavsen, Vacuum insulation panels for building application. A review and beyond, Energy and Buildings 42 (2010) 147-172.
9. M.J. Tenpierik, H. Cauberg, Analytical models for calculating thermal bridge effects caused by thin high barrier envelopes around Vacuum Insulation Panels, Journal of Building Physics, January 2007 vol. 30 no. 3 185-215.

10. M.J. Tenpierik, W. van der Spoel, J.J.M. Cauberg, Analytical models for predicting thermal bridge effects due to Vacuum Insulation Panel barrier envelopes, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, Bauphysik 30 (2008), Heft 1.
11. M.J. Tenpierik, H. Cauberg, Encapsulated Vacuum Insulation Panels: theoretical thermal optimization, Building Research & Information 38(6) (2010) 660-669.
12. T.I. Thorsell, I. Källebrink, Edge loss minimization in vacuum insulation panels, in Jóhannesson, G. (Eds.), Proceedings of the 7th Nordic Building Physics Symposium, 2005, pp. 945–952.
13. K. Ghazi Wakili, T. Stahl, S. Brunner, Effective thermal conductivity of a staggered double layer of vacuum insulation panels, Energy and Buildings 43 (2011) 1241–1246.
14. P. Johansson, Vacuum Insulation Panels in Buildings. Literature review, Report in Building Physic, 2012.
15. A. Binz, A. Moosmann, G. Steinke, U. Schonhardt, F. Fregnan, H. Simmler, et al., Vacuum insulation in the building sector. Systems and application (Subtask B), Final Report for the IEA/ECBCS Annex 39 HiPTI-project High performance thermal insulation for buildings and building systems, 2005. http://www.ecbcs.org/docs/Annex_39_Report_Subtask-B.pdf [accessed 08.10.12].
16. S. Fantucci, A. Capozzoli, F. Favorino, M. Perino, Experimental analysis on advanced insulation system, CLIMA 2013 - 11th REHVA World Congress and the 8th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings, Prague, 2013, pp. 1-10.
17. C. Sprengard, A.H. Holm, Numerical examination of thermal bridging effects at the edges ofvacuum-insulation-panels (VIP) in various constructions, Energy and Buildings (2014). 'In press'.
18. EN ISO 12667:2002. Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Products of high and medium thermal resistance, European Committee for Standardization, 2002.
19. ASTM International. ASTM C518-91 Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus.
20. T. Haavi, B. Jelle, A. Gustavsen, S. Uvsløkk, and R. Baetens, Vacuum Insulation Panels in Wood Frame Wall Constructions-Hot Box Measurements and Numerical Simulations, BEST2 Conference, Portland, Oregon, USA, 12-14 April, 2010.
21. EN ISO 10211:2007. Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures – Detailed, 2007.
22. EN ISO 6946:2008. Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method, European Committee for Standardization, 2008.
23. EN ISO 14683:2008, Thermal bridges in building construction - Linear thermal transmittance - Simplified methods and default values, European Committee for Standardization, 2008.
24. Lorenzati A., Fantucci S., Capozzoli A., Perino M. The effect of different materials joint in Vacuum Insulation Panels, SeB – 14, Cardiff, 2014. 'In press'.
25. Capozzoli A., Fantucci S., Favoino F., Perino M., Vacuum Insulation Panels: Analysis of the Thermal Performance of Both Single Panel and Multilayer Board. Energies 2015; 8: 2528-2547. doi:10.3390/en8042528
26. Decreto ministeriale Sanità 5 luglio 1975, Modificazioni alle istruzioni ministeriali 20 giugno 1896, relativamente all'altezza minima ed ai requisiti igienico-sanitari principali dei locali di abitazione
27. EN ISO 13790, Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling. 2008

5 Abbreviazioni ed acronimi

IEA	International Energy Agency
EBC	Energy in Buildings and Community Programme
IDA	Indoor Climate and Energy

λ_{cop}	Conduttività termica al centro del pannello	[W/mK]
$\lambda_{eq,EXP}$	Conduttività termica equivalente dei VIP assemblati (ottenuto sperimentalmente)	[W/mK]
ψ_{EXP}	Trasmittanza termica lineica (misurata sperimentalmente)	[W/mK]
ϕ_{EXP}	Flusso termico (misurato sperimentalmente)	[W]
R	Resistenza termica dei VIP assemblati (valore sperimentale)	[m^2K/W]
R_{VIP}	Resistenza termica dei VIP (valore sperimentale al centro del pannello)	[m^2K/W]
$\dot{Q}$	Flusso termico misurato dal termiflussimetro	[W]
$\lambda_{eq,FEM}$	Conduttività termica equivalente dei VIP assemblati (ottenuto da simulazione)	[W/mK]
ψ_{FEM}	Trasmittanza termica lineica (ottenuto da simulazione)	[W/mK]
ϕ_{FEM}	Flusso termico per unità di lunghezza (ottenuto da simulazione numerica)	[W/m]
A_m	Area di misura per le analisi sperimentali e numeriche	[m^2]
P	Semiperimetro del pannello	[m]
s	Spessore del pannello	[m]
l	Lunghezza del giunto	[m]
ϑ_{low}	Temperatura di Set point della piastra inferiore del termoflussimetro	[°C][K]
ϑ_{up}	Temperatura di Set point della piastra superiore del termoflussimetro	[°C][K]
ϑ_{avg}	Temperatura media tra ϑ_{low} e ϑ_{up}	[°C][K]
$\Delta\vartheta$	differenza di temperatura tra ϑ_{low} e ϑ_{up}	[°C][K]
λ_{Joint}	Conduttività termica del materiale di giunto strutturale	[W/mK]
R_{Joint}	Conduttività termica del giunto strutturale	[m^2K/W]
d_{Joint}	Larghezza del giunto	[m]
$\lambda_{eq,Air\ Joint}$	Conduttività equivalente della cavità d'aria tra due VIP	[W/mK]
$R_{Air\ Joint}$	Resistenza termica della cavità d'aria tra due VIP	[m^2K/W]
d	Larghezza del giunto d'aria	[m]
E	Valore di segnale elettrico generato dal termoflussimetro	[µV]
S_{cal}	Costante di calibrazione del termoflussimetro	[(W/m2)/µV]
λ_{core}	Quota di VIP conduttività termica del nucleo	[W/mK]]
λ_S	Quota di Conduttività termica della matrice solida	[W/mK]

λ_R	Quota di conduttività termica equivalente dovuta allo scambio radiativo	[W/mK]
λ_G	Quota di conduttività termica equivalente della parte gassosa	[W/mK]
λ_{cv}	Quota di conduttività termica dovuta alla convezione all'interno dei pori	[W/mK]
$\lambda_{coupling}$	Quota di conduttività dovuta agli effetti di accoppiamento	[W/mK]
λ_{fict}	Condutttività termica fittizia	[W/mK]
λ_{pro}	Conduttività termica dichiarata dai produttori	[W/mK]
R_e	Resistenza termica degli strati rivolti verso esterno (esclusa la resistenza del VIP)	[m^2K/W]
R_i	Resistenza termica degli strati rivolti verso interno (esclusa la resistenza del VIP)	[m^2K/W]
R_i+R_e	Resistenza totale degli strati addizionali	[m^2K/W]
S	Superficie dei componenti non adiabatici	[m^2]
V	Volume lordo dell'ambiente riscaldato	[m^3]
S/V	Rapporto di forma dell'edificio	[1/m]
Q_H	Fabbisogno di energia termica per riscaldamento	[KWh/m^2]
H_{TR}	Coefficiente di scambio termico per trasmissione	[W/K]
ΔH_{TR}	Variazione del coefficiente di scambio termico per trasmissione	[%]

6 Appendice

Marco Perino

Marco Perino was born the 7th of June 1963. He took his degree in Mechanical Engineering at the Polytechnic of Turin - Faculty of Engineering with a score of 110/110 summa cum laude. In 1993 he took a PhD in Energy Technologies discussing a Thesis on small power combustion heat generators.

At the end of 1992 he won a researcher position at the 2nd Faculty of Engineering of the Polytechnic of Turin. From 1997 to the end of 2004 he was Associate professor at the Faculty of Architecture of the Polytechnic of Turin. On January 1st, 2005 he started his activity as a full professor at the first Faculty of Engineering at the Polytechnic of Turin. During the years, he has given lectures on: thermal and HVAC systems, building physics, applied thermodynamic and heat transfer, control of the indoor environment, ventilation systems, thermal solar systems.

He is supervisory of about 5 Bachelor and 5 Master thesis per academic year and tutored various PhD students. Moreover, he was involved in the “Socrates/Erasmus” cooperation - EU project, delivering some lectures in different European Universities; in particular: 2000 - University of Eindhoven, The Netherland, 2006 and 2007 - University of Aalborg – Denmark, 2009, 2011, 2012 - Istanbul Technical University (ITU) – Turkey. Since 1° of April 2002, and for six months, he was visiting professor at the Aalborg University (AAU) in Denmark where he developed a join research on themes related to natural ventilation and IAQ (single side natural ventilation).

He participated, as “expert member”, to the international research groups: “Annex 26 - Energy efficient ventilation of large enclosures”, “Annex 35 - Hybrid Ventilation in New and Retrofitted Office Buildings ” and "Annex 44 -Integrating environmentally responsive elements in buildings" (subtask leader of "responsive building elements") promoted by the International Energy Agency (IEA). He actively participated to project ESA-UNET (Subproject C: Energy Conservation in large Buildings), financed by the European Community, devoted to promote technical and scientific exchanges between European Universities and Universities of the South-East Asia.

He was member of a working group of the WHO (Natural ventilation for infection control in health-care settings) created to draft guidelines for the use of natural ventilation for infection control in health care settings.

He was/is responsible of more than 20 research/consultancy contracts of the Department of Energy of the Politecnico di Torino and of different research projects financed by the Italian Ministry of Education or Regional Authorities (in the years 2005 – 2012). He was the local responsible for the European Project – Marie Curie Training Network “CityNet” concerning energy conservation in building and energy planning at urban scale. Currently he is local responsible for the Intelligent Energy - Europe Project - “IDES-EDU”. He participates to the European Project – Concerto “PolyCity” (energy retrofit of urban quarters). he was member of the international working group of the ISIAQ Association “ISIAQ Task Force – Working group 21”, which dealt with the indoor environment control in museums. During the years the research activity of Marco Perino has been focused on the following subjects:

- small power heat appliances and combustion analysis,
- IAQ and pollutants dispersion inside confined spaces,
- air distribution and ventilation systems,
- HVAC systems and their thermofluidynamic analysis,
- domestic hoods,
- ventilation of large enclosures,
- natural and hybrid ventilation systems,
- experimental and theoretical analysis of single-side ventilation,
- indoor environment analysis/control in museums and historical buildings,
- thermofluidynamic analysis of traditional and innovative building envelope components,
- Indoor Environment Quality assessment,

- thermofluidynamic analysis and thermo-hygrometric control of museum showcases,

He was/is member of the Scientific Committee of the following conferences:

- AIVC 2008, 2010
- RoomVent 2007, 2009, 2011
- IAQVEC 2007 & 2010
- Indoor Air 2008
- IBPC – International Building Physic Conference 2009, 2012, 2015
- EERB-BEPH 2009 - The Fifth International Workshop on Energy and Environment of Residential Buildings
- Climate 2013.

He is reviewer for the following international journals: Energy and Buildings, Building and Environment, Indoor Air, Building Simulation, HVAC & Research, Journal of Power and Energy, Applied Thermal Energy. He is AICARR (Italian Chapter of the ASHRAE Society), ASHRAE and ISIAQ (International Society of Indoor Air Quality) member.

He was member of the technical committee for the design of the showcase for the self-portrait of Leonardo and for the environmental monitoring during the temporary exhibition “Leonardo, il genio, il mito” at La Reggia della Venaria Reale.

The research activity is summarized in about 145 scientific papers published on national and international conference proceedings, national and international journals and books.

(publications list: http://porto.polito.it/view/creators/Perino=3AMarco=3A002029=3A.html)

Stefano Paolo Corgnati

Stefano Paolo Corgnati, graduated with honors in Mechanical Engineering and Ph.D in Energetics, is Associate Professor at the Energetics Department of the Politecnico di Torino, where he teaches building physics, building energy systems and sustainable building design at the 1st Faculty of Architecture. He works in the TEBE research group (www.polito.it/tebe) focusing on energy&buildings and indoor environmental control.

He is Vice-President of Rehva (Federation of HVAC European Associations) and member of Rehva Board of Directors.

He is member of the Directive Board of AICARR (Italian Association of Air Conditioning) and AICARR delegate for relations with Rehva.

He is the author of more than 180 scientific, technical and didactic publications, mainly concerning: radiant panels technologies, objective and subjective assessment of indoor environmental comfort, thermal mass activation techniques, energy certification and demand of existing buildings. For the quality of his research activity, he won in 2009 the Rehva “Young Scientist Award”. Moreover, in 2011 he was nominated “Rehva Fellow”.

He is involved in a number of National, European and International Research Projects on building energy consumptions.

He is sub-task leader of the research project Annex 53 “Total Energy Use in Buildings” of the International Energy Agency (IEA-ECBCS). He is chair of the REHVA Task Force on “Indoor Climate Quality Assessment”. He is the operative manager of the Research Competence Centre TI-Green of Politecnico di Torino & Telecom about smart energy monitoring in buildings.

From 2008 to 2010, he was member of the Editorial Board of the Journal “CDA” (Condizionamentodell’Aria, Air Conditioning) and of the following “AICARR Journal”, official journals of AICARR. In 2009 and 2010, he was coordinator of the working group of Politecnico di Torino aimed at supporting Piedmont Region for the implementation and application of Building Energy Certification.

Alfonso Capozzoli

Alfonso Capozzoli graduated in Mechanical Engineering and obtained a PhD in Mechanical Engineering Systems at University of Naples Federico II. Currently he works as assistant professor -with a tenure track position for associate professor- at the Department of Energy of Politecnico di Torino. From 2014 he is

qualified for associate professor position (Italian Ministry for University and Research). He teaches HVAC systems and building physics at the Faculty of Engineering and Architecture.
During the PhD, his research activity was related to HVAC systems, energy performance dynamic simulation in buildings, thermal building physics, indoor humidity control analysis, energy saving strategies in air conditioning.
More recently his research fields have been focused on inverse modeling, smart building in smart cities, fault detection and diagnosis, energy data analysis, thermal management in data centers and super insulating materials in building components.
He was member of the Directive Board of IBPSA-Italy (International Building performance Simulation Association) and he is an expert within CTI (Italian thermo-technical committee) on energy certification and building energy performance.
He was chairman in several technical sessions in international conferences on building energy performance. He has been member of the Scientific or Organizing Committee of the following conferences: IBPSA-Italy Conference Building Simulation Applications (BSA 2013, BSA 2015), International Building Physics Conference (IBPC 2015), International Conference on Sustainability in Energy and Buildings (SEB 2014, SEB 2015), 12th International Conference on the European Energy Market (EEM15).
He is involved as principal investigator in International Research Projects on building energy performance financed by European Commission. He is active in various research groups of the International Energy Agency (IEA- EBC) and in the Joint Program "Smart Cities" in EERA (European Energy Research Alliance).
Alfonso Capozzoli has been responsible for different research/consultancy scientific contracts of the Department of Energy at the Politecnico di Torino and for research projects financed by the Italian Ministry of Economic Development and ENEA (Italian National Energy Agency).
He is reviewer for some of the most relevant international journals in the building physics sector e.g.: Applied thermal engineering, Building and Environment, Journal of Cultural Heritage, Energy efficiency, Applied Energy, Neurocomputing, Expert systems with applications, Measurement.
His research activity is summarized in more than 70 scientific papers published in international journals and conference proceedings.

Enrico Fabrizio

Enrico Fabrizio, born in Torino in 1978, graduated in Architectural Sciences and PhD in Energy Technologies at the Politecnico di Torino, PhD in Génie Civil (Thermique du bâtiment) at the INSA de Lyon, since 2008 is researcher/assistant professor at the DISAFA Department of the University of Torino. He carries out research activities in the fields of thermal physics of buildings, HVAC systems, assessment of the territorial and landscape impacts of renewable energy technologies and zero-energy buildings energy performance simulation and optimization. From 2004 to 2007 he was PhD student and grant researcher at the Department of Energy of the Politecnico di Torino, in the TEBE Research Group. He took part to various research projects funded by Italian Ministry, Piedmont Region, Regione Autonoma Valle d'Aosta and private companies. He is PI of a SIR research project funded by MIUR (2015-2017).
He has been awarded the "REHVA Young Scientist Award 2014" by the European Federation of Air Conditioning Associations (www.rehva.eu). He is a founding member of IBPSA-ITALY, Italian Section of the International Building Performance Simulation Association, member of its Board and Secretary of the Association. Among more than 130 scientific publications, he is co-author of 23 research articles on the international journals. He was in charge of the evaluation of various research projects on behalf of the UE COST Office, the Swiss National Foundation Agency, the French ANR-CEA, the Estonian Research Council and the Chilean Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica.

Valentina Fabi

Degree in Architecture (Construction) at the Politecnico di Torino in 2008, she achieved her PhD in Innovation for the Built Environment at the Politecnico di Torino in 2013, under the co-supervision of Prof. Marco Filippi, Prof. Stefano Corgnati and prof. Bjarne Olesen and Rune Andersen (Denmark DTU Technical University). Her PhD addressed the issue of the indoor environmental quality through in- field monitoring

and numerical models definitions, investigating the relationship between the behaviour of the building occupants, IEQ levels, costs and energy performance of the building. She is currently part of the Department of Energy at the Politecnico di Torino as a grant researcher. Her research activities are related to behavioural modelling, statistical analysis, energy engagement of both office and residential users. She is author of scientific publications in international journals and conference proceedings mainly concerning the impact of occupant behavior on energy consumption and indoor environmental quality in both residential and office buildings.

Stefano Fantucci

Graduated Cum Laude in Architecture at Politecnico di Torino in 2011, discussing a thesis about an innovative high performance dry system for opaque building envelope. From 2012 to 2014 he was grant researcher at the department of Energy. He is currently a PhD candidate in "Energetics" at Politecnico di Torino. His research activities are mainly focused on experimental and numerical analysis of innovative strategies and technologies for Zero Energy Buildings. Currently, his main activity deals with the development of concepts and the design of multifunctional envelope systems characterized by active/responsive behavior and high thermal performances.
He has been teaching building physics as a contract professor and assistant teaching for several Architectural courses at Politecnico di Torino. He was/is co-supervisory of more than 20 Bachelor and Master thesis in Architecture and Engineering.
He is the author of more than 15 scientific publications, for international journals and conference proceedings mainly concerning: Building envelope technologies, thermal insulation, adaptive envelope technologies and advanced building materials and components. He is a reviewer for some of the most relevant international journals and conference in the sector of energy conservation in buildings.

Alice Lorenzati

Master degree in Building Engineering at Politecnico di Torino in 2014, discussing a thesis about the experimental and numerical thermal characterization of Vacuum Insulation Panels and related thermal bridging effects (super insulation sector). She is currently a PhD candidate in "Metrology" at Politecnico di Torino and INRiM (Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica). Her research activities are focused on experimental and numerical investigation of novel materials for energy efficient buildings (both thermal performance and transient studies). Currently, her main activity deals with the thermal analysis of Vacuum Insulation Panels, in order to evaluate the reliability of the existing testing methods and possible implementations (pre-normative level). Meanwhile the evaluation of VIPs assemblies thermal behavior in building application (thermal bridging effects) is also deeply analyzed. She is the author of some scientific publications, for international journals and conference proceedings mainly concerning: building envelope thermal insulation, Super Insulating Materials; advanced building materials and components. She is involved (with Politecnico di Torino and INRiM) in the international EBC Annex 65, about Long Term Performance of Super-Insulating Materials in Building Components and Systems.

Valentina Monetti

Master degree in Architecture (Construction) at the Politecnico di Torino in 2011. She achieved her PhD in Innovation for the Built Environment at the Politecnico di Torino in 2015, under the co-supervision of Prof. Marco Filippi and Prof. Enrico Fabrizio. She is grant researcher at TEBE group (Technology Building Energy Environment). Her main research topics refer to the buildings energy performance assessment by means of dynamic building simulation software, calibration of building energy models, economic evaluation of different envelope and system configuration based on the cost optimal methodology, design of zero energy buildings and sustainable buildings. She is author of scientific publications in international journals and conference proceedings mainly concerning the building simulation application for the building energy assessment, cost-optimal analysis for the existing building retrofit and the calibration of building energy models based on monitoring.

Francesco Isaia

Francesco Isaia graduated with honors in Building Engineering at Politecnico di Torino, he also attended the Alta Scuola Politecnica program, obtaining the relative Diploma and a Double Master's degree in Building Engineering with Politecnico di Milano. He is currently part of the Department of Energy at the Politecnico di Torino through a research grant.

His research activity deals with the Experimentral and numerical assessment of the building envelope thermal performance, focusing his attention on super insulating materials. He is the author of some scientific publications in conference proceedings mainly concerning: building envelope thermal insulation and Super Insulating Materials.

Gianluca Serale

P.hD student in Energetics at Politecnico di Torino, in active storage system for buildings linked with the smart grid. Previously worked over a year as a grant researcher at Politecnico di Torino. His main topics are: R&D of solar thermal system based on two components heat transfer fluids (with the companies Teknoenergy & Teseo) and energy audit of unconventional environments such as hospitals (with ExitOnes), museum showcases environment (with Goppion) Data Centers (with Telecom) and yatch (with Azimuth-Benetti). During this period he has been supervisor of over ten master thesis. Moreover, taught in some classes of thermal engineering and building physics at Politecnico di Torino and he is consultant and designer for some project of energy saving and civil engineering.

Over ten papers on international journals attest his passion for research. Moreover, he won some awards for his study experiences: FinPiemonte-CRT (2011), Unione Industriali di Torino (2012-2013), AiCARR (2012-2013) e dal G.S.E. (2013). The last one "Best thesis on renewable sources 2013" was handed to him by the Italian Republic President during the "Leonardo Prize - Italia Quality Committee" ceremony.