



Ricerca di Sistema elettrico

Realizzazione di strutture multistrato contenenti  
Materiali a Cambiamento di Fase (PCM) per la  
realizzazione di celle frigorifere

*Paolo Principi, Roberto Fioretti*



**Università Politecnica delle Marche**  
**DIISM – Dipartimento di Ingegneria**  
**Industriale e Scienze Matematiche**

REALIZZAZIONE DI STRUTTURE MULTISTRATO CONTENENTI MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE (PCM)  
PER LA REALIZZAZIONE DI CELLE FRIGORIFERE

Paolo Principi, Roberto Fioretti (Università Politecnica delle Marche – Dip. DIISM)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

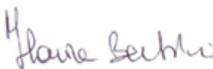
Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: C1 Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi

Obiettivo: Tecnologie per l'industria del freddo

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Realizzazione di strutture multistrato contenenti Materiali a Cambiamento di Fase (PCM) per la realizzazione di celle frigorifere".

Responsabile scientifico ENEA: Dott. Massimo Schwarz



Responsabile scientifico DIISM – UNIVPM Prof. Ing. Paolo Principi

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	6
2.1 ANALISI DELLO STATO DELL'ARTE .....	6
2.1.1 <i>Le celle frigorifere</i> .....	6
2.1.2 <i>PCM (Phase Change Material)</i> .....	7
2.2 ANALISI NUMERICA .....	17
2.3 ANALISI SPERIMENTALE.....	26
2.3.1 <i>Elementi contenenti PCM</i> .....	31
2.3.2 <i>Sistema di monitoraggio</i> .....	32
2.4 RISULTATI .....	40
2.4.1 <i>Analisi numeriche</i> .....	40
2.4.2 <i>Analisi sperimentale</i> .....	136
2.4.3 <i>Validazione del metodo di analisi numerica con i dati sperimentali</i> .....	153
2.4.4 <i>Confronto tra il modello teorico e il modello reale (dati meteo Ancona – superficie Orizzontale)</i> .....	155
3 CONCLUSIONI.....	157
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	158
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	159

## Sommario

Nel presente documento vengono descritte le attività svolte e i risultati ottenuti all'interno dell'Accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell'Università Politecnica delle Marche. Il gruppo di ricerca ha condotto delle analisi preliminari per verificare il raggiungimento di benefici di risparmio energetico derivante dall'uso di materiali in passaggio di fase, PCM (Phase Change Materials) nell'involucro delle celle frigorifere destinate al trasporto di materiali deperibili. Partendo da una prima fase di analisi dello stato dell'arte, si è passati all'impostazione di una metodologia di studio teorica e sperimentale, e all'utilizzo di tale metodo di analisi per effettuare le prime valutazioni sui benefici dell'applicazione di PCM nelle celle frigorifere.

Una serie di simulazioni numeriche, eseguite con un software di calcolo che utilizza gli elementi finiti, sono state realizzate variando le condizioni climatiche, l'esposizione, il tipo di materiale a cambiamento di fase, e lo spessore di tale materiale. Dai dati ottenuti è possibile estrapolare informazioni utili al dimensionamento dello strato di materiale a passaggio di fase e valutare il beneficio in termini energetici dell'applicazione. I primi risultati di tali analisi vengono riportati in questo documento, ed evidenziano come attraverso l'applicazione dei materiali a cambiamento di fase sulle superfici esterne delle celle frigorifere sia possibile ridurre i carichi termici che determinano i consumi elettrici di tali apparecchiature.

L'ultima fase ha riguardato una prima sperimentazione dell'applicazione di PCM su celle frigorifere sottoposte a condizioni climatiche reali esterne. In tale sperimentazione, condotta durante il periodo estivo, sono stati monitorati due moduli della stessa tipologia, differenziati dalla presenza o meno dello strato di PCM in copertura. Per tale analisi sperimentale, un sistema di packaging costituito da elementi modulari in alluminio è stato realizzato. Alla fine del lavoro è stato effettuato un confronto tra i dati ottenuti dall'analisi numerica con i dati sperimentali.

## 1 Introduzione

Il gruppo di ricerca del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell'Università Politecnica delle Marche durante il periodo di lavoro relativo al presente accordo di collaborazione con l'ENEA ha condotto le analisi preliminari per verificare il raggiungimento di benefici di risparmio energetico derivante dall'uso di materiali in passaggio di fase, PCM ( Phase Change Materials) nell'involucro delle celle frigorifere destinate al trasporto di materiali deperibili.

Il lavoro di ricerca è stato articolato nelle seguenti fasi, come previsto nei contenuti dell'accorso i:

- a) analisi teorica basata su una approfondita ricerca bibliografica per la individuazione delle tecnologie utili per lo sviluppo dell'indagine scientifica;
- b) scelta di un modello di cella frigorifera e simulazione numerica del comportamento termico della stessa;
- c) analisi sperimentale per il confronto di sistemi refrigerati di identica costruzione, di cui uno dotato di materiale in passaggio di fase.

I risultati di questo periodo di lavoro hanno permesso di verificare la fattibilità dell'uso dei PCM nel trasporto refrigerato e di conseguenza ulteriori più approfonditi studi potranno prendere origine da esse per sviluppare tecniche costruttive appropriate per raggiungere gli obiettivi fissati.

La prima fase dell'analisi teorica sarà imperniata su una approfondita ricerca bibliografica destinata ad evidenziare le principali tecnologie applicate agli scomparti refrigerati installati su mezzi di trasporto. Si vorranno in particolare esaminare le tecniche di costruzione degli scomparti e classificare i materiali utilizzati nella costruzione degli involucri degli scomparti soprattutto in relazione alle loro caratteristiche termo igrometriche, dimensionali e prestazionali.

Si dovranno altresì considerare i livelli di temperatura generalmente utilizzati all'interno degli scomparti refrigerati in funzione dei materiali contenuti al loro interno e verificare le tolleranze applicate dalle possibili normative tecniche nazionali ed internazionali applicate al sistema del trasporto refrigerato. Verranno altresì analizzati con gli stessi presupposti di approccio il livelli di ventilazione richiesti per l'omogeneizzazione delle temperature all'interno dello scomparto.

La seconda fase dovrà vedere analizzata la gamma di sostanze PCM, verificando le loro caratteristiche di comportamento ai ripetuti cicli di solidificazione, fusione e risolidificazione alle temperature interne di trasporto e di sosta. Questo studio dovrà portare alla scelta dei materiali più appropriati per i veri livelli di temperatura dello scomparto e per le varie condizioni ambientali esterne nelle quali il mezzo di trasporto si troverà ad operare sia in movimento che in fase di sosta.

La terza di analisi teorica dovrà vedere ipotizzati e successivamente studiati nel loro comportamento energetico i possibili pacchetti di involucro costituiti dai pannelli di base utilizzati nelle attuali applicazioni sui quali vengono applicati i PCM. Più in particolare si faranno ipotesi di stratificazione per verificare la corretta posizione del materiale

in passaggio di fase all'interno della parete e valutare gli spessori da applicare per un appropriato funzionamento per l'abbattimento del consumo energetico.

Le analisi teoriche di comportamento termico saranno condotte con l'ausilio di specifici software i quali verranno applicate le condizioni al contorno analizzate nelle fasi preliminari.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 *Analisi dello stato dell'arte*

#### 2.1.1 Le celle frigorifere

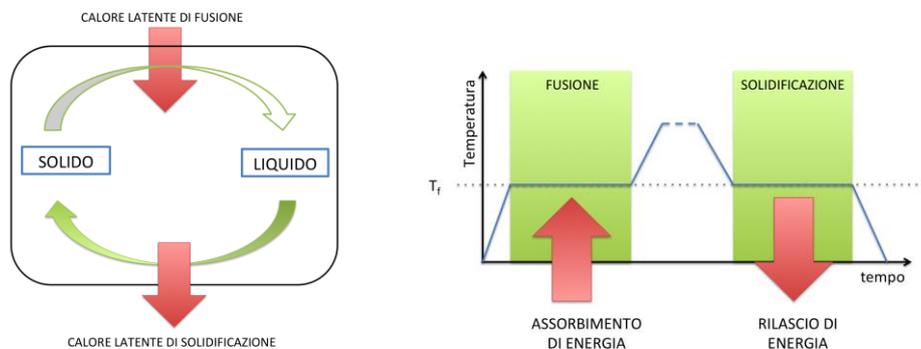
Il termine "catena del freddo" indica "la continuità di mezzi impiegati in sequenza per assicurare la conservazione a bassa temperatura di derrate deperibili dalla fase di produzione al consumo finale". In questo modo viene indicata la sequenza delle fasi con le quali alcune tipologie di prodotti alimentari riescono a raggiungerla sede del consumo finale mantenendo lo standard qualitativo iniziale. La catena del freddo che prevede alcuni passaggi quali: una prerrefrigerazione, la lavorazione del prodotto sia di origine animale che vegetale in ambiente refrigerato, lo stoccaggio in magazzini frigoriferi di conservazione presso il produttore, il trasporto dai centri di produzione ai magazzini frigoriferi di deposito e il successivo stoccaggio, la distribuzione ai centri di distribuzione e vendita. Per attuare il trasferimento di derrate deperibili fresche o congelate dai luoghi di produzione a quelli di consumo vengono impiegati sistemi di trasporto adeguati ed in grado di mantenere la temperatura ottimale richiesta. Il trasporto refrigerato viene realizzato utilizzando tutte le tipologie di trasporto: navale aereo, per finire con quello terrestre. I trasporti frigoriferi aerei e navali vengono usati per le grandi quantità di prodotto e per rilevanti distanze, mentre i trasporti terrestri di tipo ferroviario e stradale sono indicati per le distanze a medio e breve raggio. Il trasporto di prodotti deperibili viene realizzato con mezzi isotermici e mezzi refrigerati, indicando con il primo termine un contenitore il cui involucro è costituito da pareti il cui spessore e tipo di isolante termico assicura il mantenimento della temperatura interna creando una resistenza termica ai flussi termici entranti, provenienti dall'ambiente esterno per effetto delle più alta temperatura dell'aria esterna e dell'assorbimento della radiazione solare che incide sulla superficie esterna della parete stessa. Il mezzo refrigerato, oltre ad essere isolato termicamente è anche dotato di un gruppo frigorifero per l'instaurazione e il mantenimento, sotto le varie condizioni ambientali, della temperatura ottimale richiesta per il trasporto. La macchina frigorifera a compressione di vapore ha la sezione evaporante posta all'interno della cella, mentre l'unità moto condensante è posta all'esterno per permettere lo smaltimento del calore asportato dalla cella verso nell'aria esterna. Il compressore viene azionato da un motore a combustione interna, abbinato ad un motore elettrico per il funzionamento nei luoghi di sosta provvisti di sistemi di erogazione dell'energia elettrica. I ventilatori dell'evaporatore e del condensatore sono azionati dal motore. Il consumo di energia per il mantenimento delle condizioni adeguate all'interno della cella frigorifera è determinato dalla quantità di calore da smaltire il cui valore deriva dalle condizioni ambientali esterne e dalla caratteristica termica dell'involucro della cella stessa.

La necessità di ridurre il consumo energetico nel trasporto refrigerato può essere perseguito ed attuato attraverso la realizzazione d'involucro molto performanti e di impianti frigoriferi altamente efficienti. La progettazione di un involucro efficiente rappresenta il primo passo per ottenere un adeguato livello di efficienza energetica che si può conseguire attraverso un'adeguata resistenza termica e inerzia termica. L'utilizzo di materiali isolanti consente la riduzione del coefficiente globale di trasmissione termica, mentre al fine di incrementare l'inerzia termica si aumenta la massa degli elementi che compongono l'involucro. L'incremento dell'inerzia termica consente di controllare la temperatura media radiante caratterizzante la superficie interna dell'involucro, riducendo i picchi e le oscillazioni. Specialmente quando il mezzo refrigerato è sottoposto a considerevoli apporti gratuiti e solari, la massa termica assorbe parte dell'energia introdotta e riduce l'incremento della temperatura superficiale e dell'aria. Inoltre, nella trasmissione dei flussi termici dall'esterno verso l'interno, generati da una differenza di temperatura e dalla radiazione solare incidente sulla superficie esterna, l'inerzia termica consente di attenuare e sfasare l'onda termica e picchi di temperatura. Tale effetto consente di ridurre la potenza termica dell'impianto installato, calcolata sui picchi di flusso, e di sfasarla temporalmente, in modo da portarla verso le ore notturne, quando la temperatura esterna si abbassa; questa strategia evita la contemporaneità dei carichi ed in certe condizioni notturne di smaltire il calore accumulato per inerzia verso l'esterno, impedendo l'ingresso all'interno della cella e quindi determinando una diminuzione del lavoro della macchina frigorifera.

In genere le pareti della cella frigorifera sono costituite da un sandwich di materiale isolante tra due lastre sottili di metallo materiale plastico. Poiché nella fase di produzione dei pannelli l'isolante termico viene iniettato tra le due superfici metalliche o plastiche, generalmente il coibente utilizzato è costituito da schiume poliuretatiche che possono assumere diversi valori di densità.

### 2.1.2 PCM (Phase Change Material)

Sin dagli anni '70 numerose ricerche hanno analizzato la possibilità di utilizzare materiali a cambiamento di fase (PCM dall'inglese Phase Change Material) nel settore dell'efficienza energetica come accumulatori di energia termica [1]. Il principio su cui si basa l'applicazione dei PCM, è lo sfruttamento del calore latente di fusione tra lo stato solido e quello liquido e di solidificazione quando il materiale ritorna allo stato solido. La capacità termica fornita dai materiali tradizionali deriva solamente dal calore specifico ed è proporzionale alla massa in kg dell'elemento; nei PCM invece al calore sensibile si aggiunge la capacità termica data dal calore latente di fusione. La capacità termica offerta dai materiali a cambiamento di fase è sfruttabile non solo per elementi dell'involucro, ma anche per gli elementi interni, con l'obiettivo di ridurre le variazioni di temperatura, e per l'accumulo di energia termica. Inoltre la capacità termica apportata attraverso l'uso dei PCM, è utile al miglior impiego delle fonti rinnovabili e all'incremento della performance degli impianti. Vengono chiamati materiali a cambiamento di fase le sostanze che hanno la capacità di passare dallo stato solido a quello liquido e viceversa, in un intervallo di temperature tali da essere utilizzate per l'accumulo di energia. Durante il passaggio di fase avviene la rottura dei legami intermolecolari e/o molecolari, e l'energia termica assorbita per tale processo è definita calore latente di fusione. Il passaggio di fase inizia quanto la temperatura sale fino al punto di fusione. Durante il passaggio di fase, il quale necessita un'elevata quantità di energia, il materiale si mantiene a una temperatura prossima al punto di fusione. Nella solidificazione avviene il processo inverso, con il rilascio dell'energia termica e il passaggio allo stato solido. Ciascun tipo di materiale a cambiamento di fase è caratterizzato da una temperatura di fusione e un valore di calore latente di fusione.



**Figura 1: (a) ciclo di fusione e solidificazione del PCM, (b) grafico Temperatura-Tempo [2].**

La classificazione dei materiali a cambiamento di fase può essere fatta sotto diversi punti di vista. Il più diffuso metodo di suddividere i materiali a cambiamento di fase è basato sui tipi di sostanza di cui sono composti. I PCM possono essere sostanze organiche, inorganiche o eutettiche. Le sostanze organiche si suddividono a loro volta in paraffine e acidi grassi, mentre quelle inorganiche in sali idrati e metalli. A differenza delle prime due categorie che sono sostanze pure, i PCM eutettici sono delle miscele di diverse sostanze, sia organiche sia inorganiche. Tali miscele sono utilizzate per le loro migliori caratteristiche rispetto alle sostanze pure. Dalla miscelazione di più sostanze si ottengono miscele con diverse temperature di fusione, differenti proprietà termofisiche, e migliore stabilità, alla quale corrisponde una maggior durabilità.

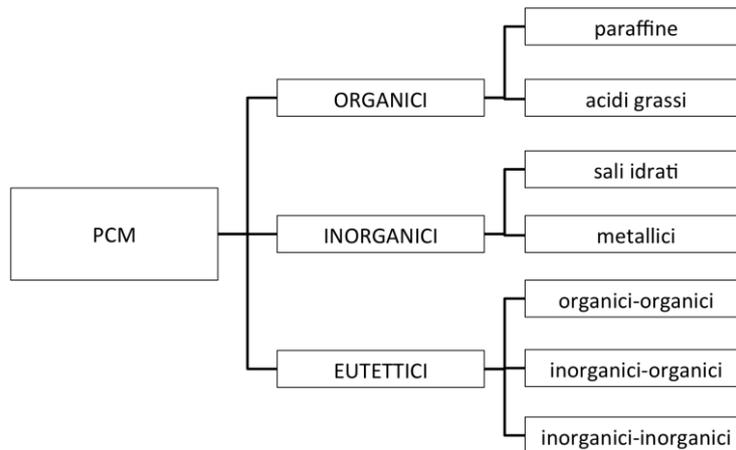


Figura 2: classificazione dei PCM [3].

Un altro modo di classificare i materiali a cambiamento di fase è secondo la loro origine, quindi naturale o artificiale (o di sintesi). Tale classificazione, in genere, viene poco utilizzata, visto che la maggior parte dei materiali a cambiamento di fase in commercio provengono da processi di trasformazione o di sintesi.

Le paraffine sono dei composti organici che, a temperatura ambiente, si presentano con una consistenza simile a quella della cera. Chimicamente parlando le cere di paraffina sono caratterizzate da una struttura molecolare lineare a catena con una serie di branchie. Il punto di fusione della paraffina cresce al crescere del numero di atomi di carbonio presenti in essa. La paraffina si presenta con due stati: la prima, sopra il suo punto di fusione, in cui è morbida e plastica e la sua struttura cristallina è di tipo lineare; il secondo, al di sotto del suo punto di fusione, in cui è dura e fragile e la sua struttura cristallina è circolare. Le due strutture cristalline, corrispondenti ai due stati, sono perfettamente reversibili anche dopo un numero molto elevato di cicli di fusione e solidificazione. Rispetto ad altri analoghi materiali, le paraffine in fase di raffreddamento non presentano problemi di supercooling, termine questo che descrive un fenomeno di raffreddamento eccessivo del materiale nelle prime fasi di rilascio del calore.

Gli acidi grassi, appartenenti anch'essi alla famiglia dei PCM organici, hanno un calore latente di fusione comparabile a quello delle famiglie delle paraffine. Gli acidi grassi hanno, come nel caso delle paraffine, la possibilità di compiere cicli senza modificare la loro capacità di accumulare e rilasciare calore. Parte di essi derivano dalla lavorazione di sostanze organiche presenti in natura ed alcuni presentano un leggero fenomeno di supercooling, trascurabile per le applicazioni nel campo delle costruzioni. Lo svantaggio riscontrato in questa categoria di PCM è la non economicità, essendo il loro costo molto più alto rispetto alle normali paraffine.

I sali idrati, composti della famiglia degli inorganici, sono caratterizzati da una formula chimica del tipo  $MnH_2O$ , dove M sta ad indicare un composto inorganico, e rappresentano una importante classe di materiali a cambiamento di fase. I sali idrati sono caratterizzati da un calore latente di fusione molto alto e da elevati valori di densità. Esistono sali idrati con punti di fusione che vanno dallo 0 ai 120°C il cui costo risulta essere spesso molte volte inferiore a quello delle paraffine. I maggiori problemi relativi all'uso dei sali idrati come PCM è dovuto al loro incongruente stato chimico: infatti, allo stato fuso diventano una soluzione acquosa satura più del sale anidro, mentre solidificando sono sali idrati. A meno che non si prendano misure specifiche, questo fenomeno risulta irreversibile; pertanto, durante il raffreddamento la fase solida non si combina con la soluzione satura, non andando così a ricostituire l'originale sale idrato. Un altro importante problema di questi sali è il già menzionato fenomeno di supercooling nelle prime fasi del raffreddamento, prima di solidificare. L'additivazione dei sali idrati o l'utilizzo in miscele eutettiche consente di stabilizzarne le proprietà e renderli adatti per l'applicazione come PCM.

Le miscele eutettiche vengono utilizzate per la loro elevata stabilità e perché, attraverso una diversa proporzione tra le componenti, è possibile modificare le proprietà fisiche del materiale, come ad esempio la temperatura di fusione.

Delle tipologie di materiali in precedenza elencati, alcuni di questi sono normalmente commercializzati: esistono diverse aziende che producono materiali a cambiamento di fase, sia in forma sfusa, che incapsulata o comprensiva di packaging.

Nome commerciale	temperatura di fusione [°C]	calore latente di fusione [kJ/kg]	densità [kg/m <sup>3</sup> ]	produttore
TH0	0	334	n.a.	TEAP
A4	4	227	766	EPS Ltd
Witco 85010-1	4	129,6	n.a.	Witco
RT2	6	156	860	Rubitherm
TH7	7	189	n.1.	TEAP
RT5	7	156	860	Rubitherm
E7	7	120	1540	EPS Ltd
C7	7	162	1420	Climator
RT6	8	174	860	Rubitherm
E8	8	140	1470	EPS Ltd
A8	8	220	770	EPS Ltd
E10	10	140	1520	EPS Ltd
E13	13	140	1780	
C15	15	130	n.a.	Climator
E21	21	150	1480	EPS Ltd
RT20	22	172	870	Rubitherm
A22	22	220	770	EPS Ltd
C24	24	216	1480	Climator
RT26	25	131	880	Rubitherm
TH25	25	159	n.a.	TEAP
S27	27	207	1470	Cristopia
STL27	27	213	1090	Mitsubishi
RT27	28	179	870	Rubitherm
GR27	28	72	750	Rubitherm
PX27	28	112	640	Rubitherm
A28	28	245	790	EPS Ltd
TH29	29	188	1540	TEAP
E30	30	201	1300	EPS Ltd
C32	32	302	1450	Climator
E32	32	186	1460	EPS Ltd
RT 35	35	157	880	Rubitherm
RT 42	43	174	880	Rubitherm
GR 41	43	63	750	Rubitherm
FB 41	43	152	880	Rubitherm
RT 41	43	152	880	Rubitherm

STL 47	47	221	1340	Mitsubishi
E48	48	201	1670	EPS Ltd
C48	48	324	1460	Climator
STL 52	52	201	1300	Mitsubishi
PX 52	53	103	640	Rubitherm
STL 55	55	242	1290	Mitsubishi
FB 54	55	135	750	Rubitherm
RT 54	55	179	900	Rubitherm
E 58	58	226	1280	EPS Ltd
C58	58	364	1460	Climator
TH 58	58	226	1290	TEAP
RT 65	64	173	910	Rubitherm
C 70	70	194	1700	Climator
PX 80	77	91	640	Rubitherm
GR 80	79	71	750	Rubitherm
FB 80	79	132	750	Rubitherm
RT 80	79	175	920	Rubitherm
PCM 80	80	231	n.a.	Mitsubishi
PCM 86	86	246	n.a.	Mitsubishi
E89	89	163	n.a.	EPS Ltd
TH 89	89	149	n.a.	TEAP
RT 90	90	194	930	Rubitherm
RT 100	99	168	940	Rubitherm
RT 112	112	213	n.a.	Rubitherm
E 117	117	169	1450	EPS Ltd

**Tabella 1: PCM in commercio [4].**

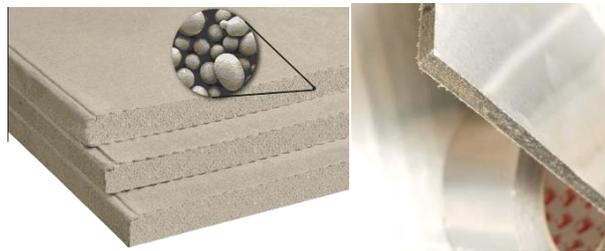
Nel settore delle costruzioni troviamo un elevato numero di applicazioni, sia nel campo della ricerca scientifica e industriale, sia in edifici sperimentali [5]. E' possibile comunque riassumere le applicazioni in:

- Pareti o elementi d'involucro [6] [7];
- Sistemi solari passivi e attivi;
- Accumulatori termici;
- Sistemi di riscaldamento e raffrescamento a pavimento;
- Scambiatori d'aria.

La prima possibile applicazione di materiali a cambiamento di fase nel settore delle costruzioni è all'interno delle stratigrafie dell'involucro: di questa applicazione esistono diverse varianti, per tecnologia, funzionamento e benefici ottenibili, ma gran parte di queste aventi l'obiettivo di conferire inerzia termica all'edificio in tecnologie leggere ed a secco.

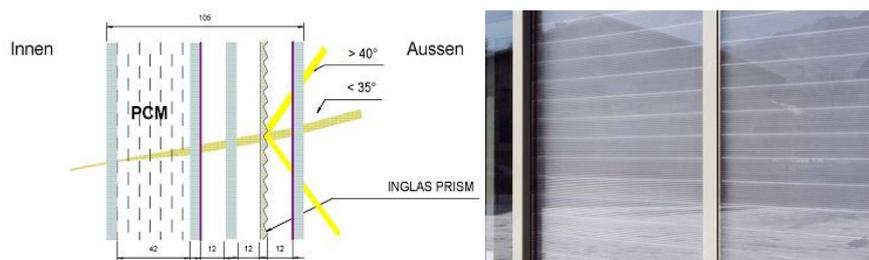
Nelle località climatiche "calde" le applicazioni sono state finalizzate alla riduzione dei consumi di energia di riscaldamento e per il miglioramento del comfort interno, attraverso l'incremento dell'inerzia termica data da uno strato di PCM posto all'interno della stratigrafia, generalmente sullo strato in prossimità del rivestimento esterno. Tale applicazione consente di assorbire gran parte della radiazione solare che genera un surriscaldamento degli elementi edilizi e produce un carico termico. Un'altra possibile applicazione sperimentata e in commercio riguarda l'applicazione del PCM, miscelato con gesso (figura 3), per la realizzazione di intonaci o pareti in cartongesso interne. Tale applicazione ha lo scopo di incrementare la

massa termica interna agli ambienti, riducendo le oscillazioni di temperatura e migliorando il comfort interno.



**Figura 3: Pannelli con PCM (a)BASF Micronal, (b)DuPont Energain.**

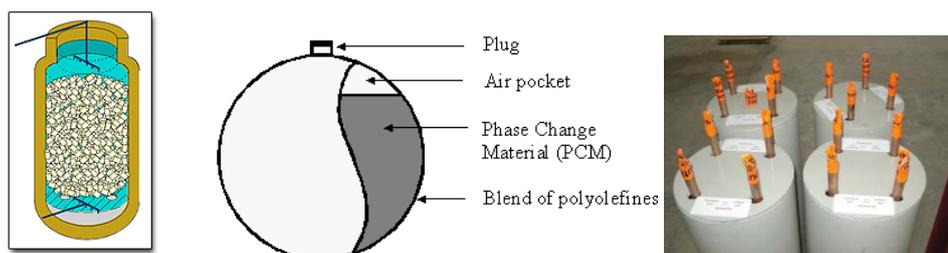
La seconda categoria di applicazioni riguarda l'utilizzo del materiale a cambiamento di fase per lo sfruttamento dell'energia solare. Con tale tecnologia, sperimentata in particolare nelle regioni caratterizzate da un clima "freddo", si utilizza il materiale a cambiamento di fase per l'accumulo dell'energia termica, sia in sistemi solari passivi (figura 4) che in impianti solari termici. Il vantaggio offerto dal PCM è l'elevata capacità termica disponibile in un piccolo spessore o volume e un limitato peso. Infatti, specie nei sistemi solari passivi, si ha la necessità di avere un'elevata massa termica per accumulare l'energia solare; utilizzando strati di PCM anziché calcestruzzo, pietra o mattoni, si riduce notevolmente lo spazio, il peso e si può lavorare con tecnologie completamente a secco.



**Figura 4 Sistema solare passivo traslucido con PCM (Inglas, GlassX)**

Grazie all'elevata capacità termica, il PCM può essere utilizzato per l'accumulo di calore. L'impiego di sistemi di accumulo contenenti PCM, anziché acqua o miscela di acqua, consente di stoccare una grande quantità di energia, attraverso lo sfruttamento del calore latente di fusione. Tali accumulatori, oltre ad avere una maggior capacità termica, hanno il vantaggio di stabilizzare la propria temperatura in un intervallo prossimo a quello di fusione, caratteristica che li rende adatti in applicazioni nelle quali si ha la necessità di un controllo della temperatura.

Si trovano applicazioni sia per l'accumulo del calore ad alta o media temperatura, sia per l'accumulo del freddo negli impianti di climatizzazione (figura 5). L'obiettivo principale dell'utilizzo di accumulatori che sfruttano il calore latente è quindi la riduzione delle masse e dei volumi di accumulo e lo stoccaggio di elevate quantità di energia termica.



**Figura 5 Accumulatori con PCM Rubitherm, cristopia, powertank**

Un'altra tipologia di applicazione è l'inserimento dei materiali a cambiamento di fase nei substrati della pavimentazione, in particolare combinato a sistemi di riscaldamento-raffrescamento radiante a pavimento, sia di tipo idraulico che elettrico.

L'applicazione a pavimento ha come obiettivo principale l'accumulo il calore in eccesso, il quale viene rilasciarlo lentamente, e di incrementare il comfort microclimatico interno attraverso la stabilizzazione della temperatura. L'applicazione a pavimento può anche essere vista anche come sistema solare passivo diretto: applicando materiale a cambiamento di fase su strati del pavimento a ridosso delle pareti esposte a sud, questo funzionerà come un accumulatore di energia proveniente dalla radiazione solare entrante dalla superficie vetrata. Un possibile vantaggio, utilizzato nei paesi dove la tariffa elettrica notturna è particolarmente economica, può derivare dall'abbinamento con resistenze elettriche che "caricano" il PCM durante la notte, il quale rilascia il calore durante il giorno.

In tutti i casi sopra elencati si ha comunque il vantaggio di apportare all'ambiente interno una grande quantità di massa termica, la quale tenderà comunque a migliorare le condizioni di comfort microclimatico attraverso il controllo delle oscillazioni di temperatura superficiale e quindi radiante. Per questa applicazione il materiale a cambiamento di fase può essere inserito sia in forma sfusa inglobato nel massetto oppure inserito in elementi, i quali andranno a costituire il supporto per il passaggio delle serpentine dell'impianto (figura 6).

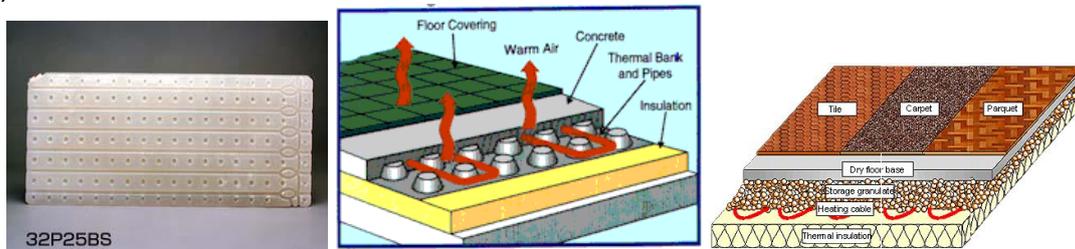


Figura 6: Sistemi a pavimento: (a) Sumika, (b) Dorcken, (c) Rubitherm.

Un'altra applicazione è negli scambiatori a soffitto o inglobati negli impianti di ventilazione meccanica. L'idea è quella di scambiare calore con il flusso d'aria in ingresso, in modo da stabilizzarne la temperatura mantenendola vicino a quella di fusione: i materiali a cambiamento di fase raffreddano l'aria in ingresso durante le giornate estive, e riscaldano l'aria d'ingresso nelle ore notturne. Durante il giorno, quando la temperatura dell'aria sale sopra il punto di fusione, il PCM inizia a fondere e assorbe calore dall'aria in ingresso, la quale viene immessa nell'edificio ad una temperatura più bassa rispetto a quella dell'aria esterna. Durante la notte, quando la temperatura scende sotto il punto di fusione, il PCM solidifica cedendo calore all'aria, la quale può essere introdotta negli ambienti interni o espulsa. In questa maniera si ha una stabilizzazione della temperatura degli ambienti interni, un raffreddamento di giorno e un riscaldamento notturno (figura 7).

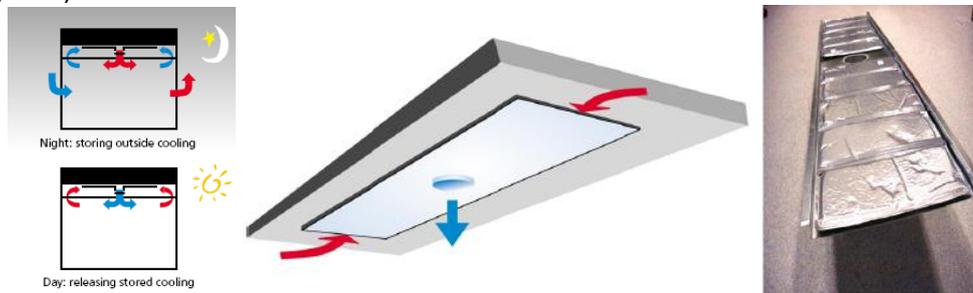


Figura 7: Scambiatore ad aria all'interno del controsoffitto.

Fino ad ora sono stati realizzati diversi edifici che utilizzano tecnologie d'involucro e impiantistiche contenenti PCM. Gran parte di essi sono edifici a carattere sperimentale, dove, insieme ai PCM sono state integrate altre tecnologie innovative per determinare una riduzione significativa dei consumi e un miglioramento del benessere termoigrometrico.

La 3-liter haus (2001) è un intervento di ristrutturazione di un edificio residenziale degli anni '50 nel distretto di Friesenheim a Ludwigshafen, in Germania. L'obiettivo dei promotori di tale intervento è stato quello di portare i consumi dell'edificio ad un valore inferiore ai 3 litri al metri quadro all'anno attraverso l'utilizzo di tecnologie innovative. L'intervento ha interessato sia l'involucro sia l'impianto, e in tale esempio, il PCM è stato applicato negli elementi di finitura interni, attraverso l'utilizzo di intonaci contenenti paraffina incapsulata BASF Micronal. Con tale applicazione è stato possibile incrementare il comfort termico interno attraverso l'apporto di massa termica nelle strutture esistenti, oltre ad ottenere nel suo complesso, una riduzione di oltre l'80% dei consumi di combustibile per il riscaldamento

In maniera del tutto analoga la DuPont ha iniziato a sperimentare il proprio pannello Energain all'interno di edifici residenziali, uffici, scuole, situate nel Regno Unito e in Francia. Energain è un pannello composto da copolimeri e PCM, rivestito in alluminio e adatto all'applicazioni all'interno di pareti o soffitti. Queste applicazioni hanno portato a un miglioramento delle condizioni di benessere interno e un risparmio di energia per la climatizzazione estiva e invernale.

Di notevole interesse sono le applicazioni fatte dalla Glass X nella casa di riposo di DOMAT EMS (2004), nella Solarhaus III a Ebnat Kappel (2001) e in altri edifici in Svizzera e Germania. In tali interventi, pareti traslucide, composte da strati di vetro ed elementi modulari contenenti PCM funzionano come sistemi solari passivi. Oltre ad incrementare gli apporti solari, specie nelle stagioni fredde, tale tecnologia presenta un innovativo sistema di schermatura con vetri prismatici che filtrano la radiazione solare quando supera un certo angolo d'incidenza, evitando così il surriscaldamento estivo. Questo sistema di facciata caratterizza esteticamente i prospetti esposti verso sud e gli ambienti interni, offrendo inoltre elevati livelli di illuminazione naturale, isolamento e capacità termica.

Altri edifici utilizzano invece il PCM in serbatoi per l'accumulo di energia termica ad ausilio degli impianti di climatizzazione. In particolare troviamo esempi sviluppati dall'azienda EPS Ltd, nel Malaysian ZEO Project, un edificio ad energia quasi zero e nel Headquarters of Melbourne City Council.

Nella Town house a Stevenage (Regno Unito) l'applicazione del Cooldeck della Climator, un sistema a controsoffitto combinato con la ventilazione, ha permesso di ridurre notevolmente l'utilizzo dell'impianto di climatizzazione. Il sistema sfrutta la ventilazione notturna per far scaricare il PCM, il quale durante le ore diurne assorbirà calore dall'aria degli ambienti, determinando una riduzione dei picchi e delle oscillazioni di temperatura dell'aria intera.

Al di fuori del settore delle costruzioni, possiamo trovare in commercio prodotti che sfruttano la capacità di accumulo dei materiali a cambiamento di fase nel settore medico, per la conservazione delle sostanze organiche durante i trasporti, e le terapie di traumi, nel settore alimentare, la conservazione dei cibi, nel settore vestiario per abiti per attività in condizioni estreme, nel settore elettronico ed informatico per il raffreddamento di circuiti elettrici. Nel settore del trasporto di medicinali e alimenti, i materiali a cambiamento di fase vengono inseriti in contenitori isolati e utilizzati principalmente per la stabilizzazione delle temperatura di contenitori per periodi di tempo limitati, in assenza di sistemi di climatizzazione (figura 8). Nel trasporto di medicinali o organi, in particolare si sfrutta l'elevata capacità del PCM di mantenere costante la temperatura anche nel caso di sistemi di termostatazione non particolare efficienti, e per compensare eventuali piccoli malfunzionamenti, che determinerebbero il deterioramento del materiale contenuto.



**Figura 8** Contenitori per il trasporto di alimentari, medicinali, o liquidi organici.

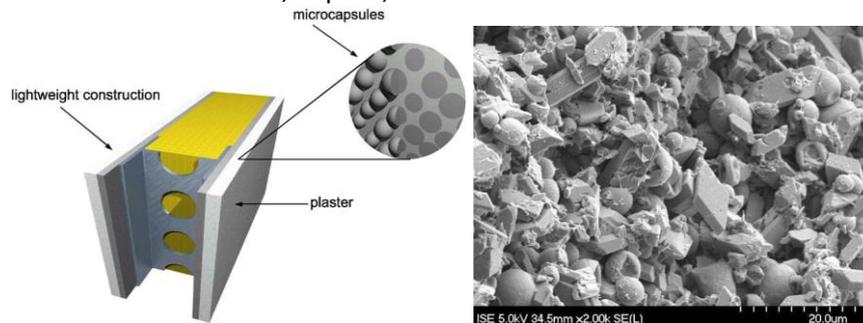
Uno degli aspetti più importanti da considerare nelle applicazioni di PCM è il tipo di sistema di contenitore che viene utilizzato per contenerli e non disperderli. Oltre all'esigenza di garantire la tenuta stagna ed evitare sversamenti o che l'aria entri a contatto con il PCM, si ha anche l'esigenza di favorire lo scambio termico. Infatti alla base del funzionamento del PCM c'è un trasferimento di energia dall'ambiente al materiale che favorisce il processo di fusione e inverso quando la temperatura scende i materiali a cambiamento di fase necessitano, rispetto ai materiali tradizionali, maggiori attenzioni, sia a livello progettuale, che nella tecnologia e nell'applicazione. Quindi a causa del passaggio di fase, e la presenza in alcuni momenti di materiale allo stato liquido, comporta la necessità di un sistema di packaging che non permetta dispersione di materiale. Questa problematica è stata risolta attraverso l'utilizzo di diverse tecnologie, l'incapsulamento in sfere, l'utilizzo di contenitori di diversa forma, dimensione, materiale, e l'inserimento in matrici di materiali solidi.

Nell'utilizzo in capsule o microcapsule (figura 9-10) il materiale viene racchiuso in sfere di materiale plastico di dimensioni nell'ordine dei millimetri o di dimensioni inferiori. Il materiale così protetto è utilizzabile in maniera semplice e miscelabile ad altri materiali, quali intonaci, calcestruzzi, cartongesso, massetti ecc.



**Figura 9 BASF micronal**

Un vantaggio ad avere microcapsule sta nel fatto di avere il materiale in piccole quantità e in ridotte dimensioni, questo riduce al minimo possibili effetti di segregazione dei materiali, in particolare nei sali idrati. La limitazione di questa soluzione, anche se a livello tecnologico risulta la più sicura e semplice nell'applicazione, è la quantità di materiale che effettivamente viene contenuto nell'elemento, che in genere non rappresenta neanche la metà, in peso, del totale.



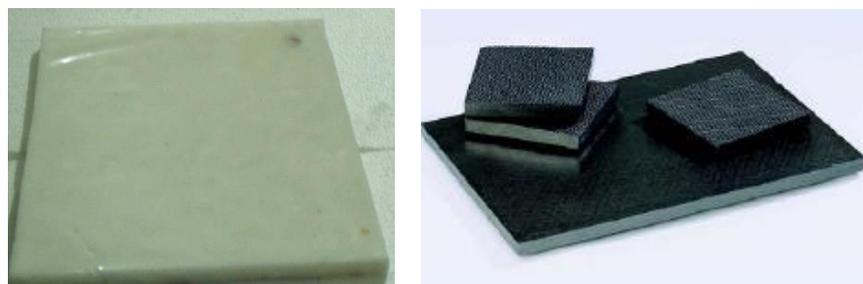
**Figura 10 materiali a cambiamento di fase in matrici solide**

Oltre alla soluzione in microcapsule la seconda possibile tecnologia di contenimento è in contenitori (figura 11). Esistono in commercio una moltitudine di packaging studiati per le diverse applicazioni, nella scelta risulta essere di fondamentale importanza il materiale con cui viene a contatto il materiale a cambiamento di fase. Contenitori plastici sono preferibili a quelli metallici a causa di possibili fenomeni corrosivi, specie se si utilizzano sali; forma e dimensioni dipendono essenzialmente dal tipo di utilizzo che si andrà a fare.



**Figura 11 EPS, GlassX, EPS, Rubitherm**

Recenti studi hanno portato a soluzioni tecnologiche diverse da quelle sopraelencate, come ad esempio l'inserimento in elementi composti da matrici di grafite, all'interno di vetri, e a forma stabilizzata (figura 12).



**Figura 12 PCM in forma stabilizzata e in matrici di grafite**

Dovendo comunque prevedere una tecnologia per il contenimento dei materiali a cambiamento di fase, ed essendo alcuni di questi materiali di origine chimica, si dovrebbe comunque verificare preventivamente la compatibilità con i materiali con i quali verranno a contatto (Tabella 2).

Phase Change Material	acciaio inossidabile	acciaio dolce	rame	alluminio	leghe di alluminio con Magnesio	Plastiche
acqua	x	x	x	x	x	x
CaCl <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O / CaBr <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O		x	x			x
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 10H <sub>2</sub> O + additivi	x	x				x
CaCl <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O		x	x			x
Glicole Polietilene	x	x	x	x	x	x
Paraffine	x	x	x	x	x	x
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 10H <sub>2</sub> O	x	x	x			x
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 10H <sub>2</sub> O	x	x	x		x	x
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> 12H <sub>2</sub> O	x	x	x			x
MgCl <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O / Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O		(rivestito)				x
CH <sub>3</sub> COONa 3H <sub>2</sub> O	x	x	x			x
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O	x	(rivestito)				
MgCl <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O		x				

**Tabella 2 compatibilità di alcuni PCM con materiali usati per il contenimento**

La seconda valutazione da fare quando si sceglie di utilizzare PCM è relativa alla durata del materiale e alla capacità di passare di fase e tornare alle condizioni iniziali, quindi alla sua stabilità nel tempo; non tutti i materiali a cambiamento di fase hanno questo problema, e per alcuni di questi risulta risolvibile attraverso la miscelazione con additivi che ne stabilizzano le prestazioni nel tempo. In genere per le paraffine, quindi i composti organici, non esistono problematiche relative alla stabilità, al supercooling e di nucleazione. Nei sali idrati invece uno dei principali limiti è quello della durabilità. Il principale problema per la quale il materiale non riesce a mantenere inalterate le sue caratteristiche nel tempo è dovuto ad uno stato liquido incongruente e un conseguente innescarsi di fenomeni segregativi. Questi creano una stratificazione che porta ad una separazione delle diverse fasi e nel momento della solidificazione non consente il formarsi di

tutto il cristallo; addensando il materiale si evita questo fenomeno, o quantomeno si riduce fino a valori minimi e stabili nel tempo. I problemi di nucleazione, i quali provocano un sottoraffreddamento prima della solidificazione, si possono risolvere attraverso l'aggiunta di un nucleation agent il quale favorisce la cristallizzazione del sale idrato.

A livello progettuale volendo utilizzare i materiali a cambiamento di fase, bisogna valutare attentamente e possibilmente in maniera dinamica, il comportamento del materiale nei diversi periodi dell'anno. La scelta del più appropriato PCM, in particolare la temperatura di fusione, il corretto posizionamento all'interno della stratigrafia dell'elemento dove verrà applicato e la quantità necessaria, va' fatta in funzione delle condizioni ambientali esterne, interne, dall'utilizzo dell'edificio, e dal beneficio che si vuole ottenere.

Nella progettazione è necessario verificare che il materiale, nel periodo del ciclo considerato, passi di fase e ritorni successivamente nelle condizioni iniziali, in modo da essere di nuovo pronto per il prossimo ciclo. Se in un giorno la temperatura rimane per tutte le 24 ore al di sotto della temperatura di fusione, il materiale non cambia di fase e quindi lavora come uno strato di materiale tradizionale. Al contrario, se una volta passato di fase la temperatura non scende sotto il punto di fusione il materiale non scarica e non ritorna solido, il che fa sì che nel giorno successivo questo non riesca ad accumulare calore.

Anche nella condizione in cui le temperature oscillassero in maniera da permettere uno scarico, si deve comunque progettare una stratigrafia in grado di far evacuare il calore, e in casi di situazioni critiche, prevedere sistemi di scarico, come ad esempio attraverso una ventilazione, meccanica o naturale oppure un circuito idraulico.

## 2.2 Analisi numerica

I materiali a cambiamento di fase, a causa del passaggio di fase e quindi assorbimento e rilascio di calore latente, rispetto ai materiali tradizionali, presentano maggiori difficoltà nella simulazione numerica. Durante il passaggio di fase si ha un assorbimento o un rilascio di energia, dovuto alla rottura dei legami molecolari, che non sempre è inseribile nei comuni algoritmi e metodologie di calcolo.

Questo vale sia per le metodologie di analisi numerica utilizzabili per lo studio di elementi o parti del sistema in esame, sia nelle metodologie di valutazione del comportamento e del beneficio dell'intero elemento. La simulazione, specialmente per tecnologie innovative, è la via più rapida ed economica per fare valutazioni sulla fattibilità o validità di un'applicazione. L'altro vantaggio determinato dall'effettuare valutazioni numeriche, magari a carattere prettamente preliminare, è quello di eliminare tutte quelle variabili e problematiche che renderebbero difficile la valutazione e il confronto in fase sperimentale. Attualmente si può fare una distinzione di base tra due tipologie di software o metodi di calcolo, non prettamente matematica, ma piuttosto collegata all'utilizzo e alla scala dell'oggetto della simulazione, nonché sull'affidabilità.

Al fine di simulare il comportamento dei materiali a cambiamento di fase esistono diverse metodologie percorribili. La prima metodologia possibile è attraverso l'utilizzo di strumenti di calcolo agli elementi finiti (FEM), differenze finite (FDM) o volumi finiti (FVM). Tali metodologie di simulazione permettono di prevedere con precisione il comportamento dei materiali in ogni possibile applicazione, richiedendo però un'elevata complessità e onerosità, limitando inoltre il calcolo a singoli elementi costruttivi o al massimo porzioni di edifici. L'altro possibile metodo, finalizzato alla previsione dell'applicazione in interi edifici, è attraverso l'utilizzo di software di simulazione dinamica quali TRANSYS, ENERGY PLUS, ESP-r. Attraverso l'utilizzo di tali software, con appositi plug-in o impostazioni interne ai programmi, si può simulare parti di edificio o interi edifici, prevederne consumi e livelli di comfort interno. Per quanto riguarda l'Energy plus, è possibile inserire uno strato di PCM inserendo semplicemente la sua funzione entalpia-temperatura e scegliendo un apposito algoritmo di calcolo; la simulazione è limitata solo ad alcuni tipi di applicazione.

Il metodo agli elementi finiti divide strutture complicate in elementi il cui comportamento, sotto determinati stati di tensione o di deformazione, è più facilmente descrivibile. Gli elementi sono poi uniti imponendo che siano soddisfatte condizioni di compatibilità e di equilibrio. Il metodo è valido non solo per la risoluzione di problemi di trasmissione del calore, ma è applicabile a settori differenti. La scelta degli elementi con cui effettuare lo studio viene fatta in modo differente a seconda che si stia trattando elementi uni-dimensionali o bi-dimensionali o tri-dimensionali, ed all'interno di queste categorie esistono comunque approcci differenti in grado di dare approssimazioni crescenti (pagando comunque un onere computazionale se si vuole una migliore approssimazione).

Il metodo agli elementi finiti è adatto per la risoluzione di qualsiasi problema connesso con i corpi continui. Esso segue lo stesso metodo di risoluzione che viene adottato con l'utilizzo del metodo matriciale, ma aggiungendo il primo tra i passi di seguito elencati agli step che generalmente vengono seguiti con l'utilizzo di quest'ultimo metodo:

- Identificazione degli elementi interconnessi ai nodi;
- Scrittura delle relazioni che esprimono il comportamento dei singoli elementi;
- Assemblamento delle equazioni finali;
- Inserzione delle condizioni al contorno;
- Risoluzione delle equazioni per trovare i valori delle temperature nodali e dei flussi uscenti dai nodi.

La scelta degli elementi con cui discretizzare il continuo influenza sensibilmente l'affidabilità della soluzione trovata.

Questa metodologia di calcolo, ha trovato la sua diffusione con l'avvento dei calcolatori, in grado di risolvere matrici e sistemi di notevole complessità.

I normali software di calcolo che utilizzano questa metodologia non hanno la possibilità di inserire il calore latente all'interno dei parametri di input e quindi non è possibile fare semplicemente delle valutazioni di questo tipo. La soluzione proposta e validata da diversi autori [8] [9] per simulare il cambiamento di fase e quindi la capacità di accumulo provocata dal calore latente, consiste nel considerare insieme il calore latente con quello sensibile. Per considerare la capacità termica derivante sia dal calore sensibile che da quello latente di fusione, si è andati a costruire una funzione calore specifico non costante, ma che contenga al suo interno anche il contributo del calore latente (figura 13). Idealmente questa curva dovrebbe avere un punto di picco in corrispondenza del punto di fusione, ma in realtà la fusione avviene in un intervallo, prossimo al punto di fusione e quindi esiste un intervallo in cui la capacità termica è data da una componente specifica più una latente. Dalla bibliografia è possibile identificare due metodologie di approssimazione della curva reale calore latente più calore specifico, una con una funzione continua e una con una funzione discontinua.

La funzione discontinua utilizzabile per considerare il calore latente è una funzione costante con gradino in corrispondenza dell'intervallo in cui avviene la fusione.

La funzione assume i seguenti valori

$$c_{\text{eff}} = c \quad \text{per} \quad T < T_{\text{fus}} - \frac{\Delta T}{2}$$

$$c_{\text{eff}} = c + \frac{c_{\text{lat}}}{\Delta T} \quad \text{per} \quad T_{\text{fus}} - \frac{\Delta T}{2} < T < T_{\text{fus}} + \frac{\Delta T}{2}$$

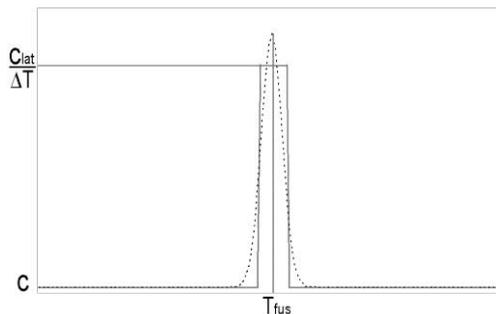
$$c_{\text{eff}} = c \quad \text{per} \quad T > T_{\text{fus}} + \frac{\Delta T}{2}$$

Un'altra metodologia per quantificare il calore effettivo derivante dal passaggio di fase è di approssimare funzione continua data da una gaussiana con la seguente relazione:

$$C_{\text{eff}} = c + c_{\text{lat}} e^{-0,5 \left( \frac{T - T_{\text{fus}}}{\Delta T} \right)^2}$$

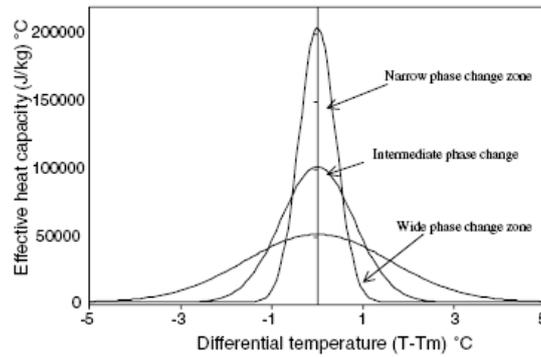
Dove

- $c_{\text{lat}}$  calore latente di fusione
- $\Delta T$  intervallo di temperature in cui avviene la fusione
- $T_{\text{fus}}$  temperatura di fusione



**Figura 13 Curve capacità termica effettiva a confronto**

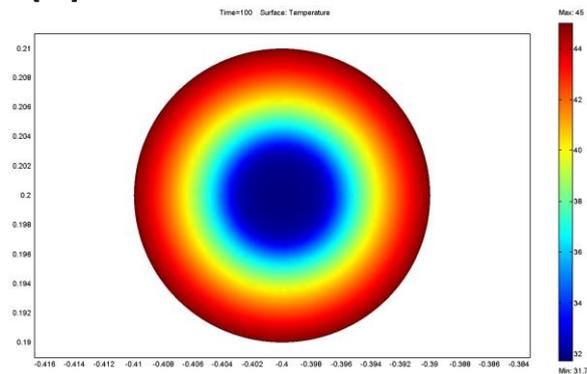
In entrambe le funzioni è possibile una volta noti il calore sensibile e quello latente, costruire curve differenti, con un intervallo di fusione più stretto o più largo, che meglio descrivano il comportamento del materiale a cambiamento di fase da simulare (figura 14). Per esempio volendo simulare il comportamento di sali idrati si dovrà considerare un intervallo di fusione molto stretto o una curva caratterizzata da un picco alto e ristretto. Al contrario per le paraffine, avendo un intervallo di fusione più ampio queste curve avranno picchi più limitati e contemporaneamente ampi.



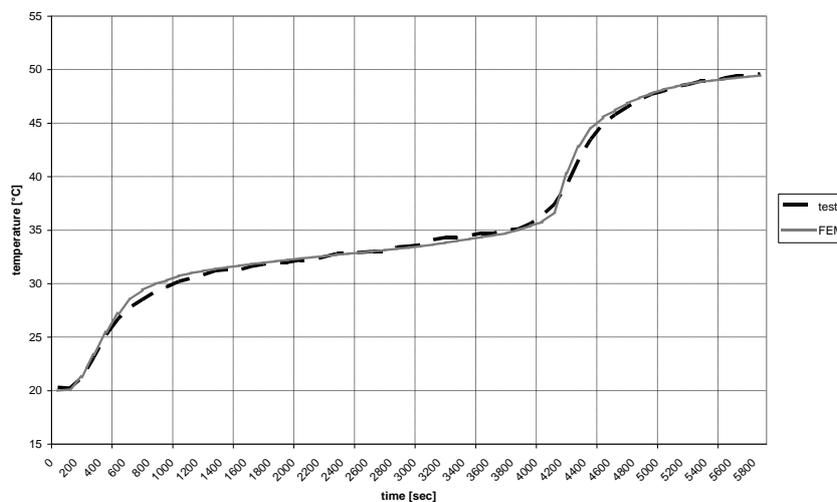
**Figura 14** Curve capacità termica effettiva

Per semplicità e rapidità di calcolo il secondo tipo di funzione essendo continua si adatta maggiormente all’inserimento all’interno di software, avendo comunque un identico grado di approssimazione e precisione.

Per risalire alle caratteristiche del materiale a cambiamento di fase, quali calore latente e punto di fusione, specifico del prodotto utilizzato, e per valicare il modello di approssimazione teorico si è andati ad effettuare delle prove calorimetriche e confrontare la curva sperimentale temperatura – tempo con quella teorica ottenuta attraverso una modellazione 2D del provino ed effettuando su questo un calcolo teorico agli elementi finiti (figura 15-16). Il provino è costituito da un contenitore cilindrico in PELD di diametro 50 mm riempito con materiale a cambiamento di fase C32, con posizionata al centro una termocoppia per il rilevamento della temperatura [10].



**Figura 15** Mappa delle temperature



**Figura 16** Temperature all’interno del provino e curva reale e simulata a confronto

Nel presente lavoro sono state effettuate analisi con lo scopo di valutare l'inerzia termica apportata dall'applicazione di materiali a cambiamento di fase ad un pannello base quale componente di una cella frigorifera con il fine di dimostrare la validità di questa soluzione per incrementarne la capacità termica per la riduzione del carico termico derivante dall'esposizione all'ambiente esterno.

Preso il pannello sandwich di base, questo è stato confrontato con lo stesso sul quale è stato applicato uno strato di PCM volta per volta a diverso spessore e natura del PCM. Sono state eseguite simulazioni con 1 cm, 2 cm, 3 cm di paraffina (PCM) e 1 cm, 2 cm di sale di Glauber (PCM) sotto diverse condizioni climatiche caratteristiche delle tre ipotetiche fasce geografiche dell'Italia: Nord, Centro e Sud, identificate con i parametri climatici (temperature dell'aria, Irraggiamento solare) delle città di : Milano, Ancona; Palermo. I risultati delle simulazioni sono stati la valutazione delle temperature superficiali interne ed esterne e dei flussi termici entranti nel pannello sottoposto agli input climatici relativi ai seguenti orientamenti: Verticale Nord, Sud, Est Ovest ed Orizzontale. L'evoluzione del flusso termico viene valutata nel periodo di un giorno ( con una scansione in secondi) ed elaborata in grafici di cui sotto si riporta un esempio.

Considerando che con "base" si intende il pannello privo di PCM, con le sigle W1, W2, W3 rispettivamente il pannello dotato di PCM paraffina con spessore 1 cm, 2 cm, 3 cm ed infine con S1 e S2 rispettivamente il pannello implementato con 1 cm e 2 cm di PCM sale di Glauber, si possono notare dalla elaborazione i vari grafici di evoluzione del flusso termico.

Per effettuare le simulazioni è stato utilizzato un software di calcolo agli elementi finiti (FEM), il COMSOL Multiphysics 4.3b. Il COMSOL è un ambiente software di modellazione e simulazione di qualsiasi sistema fisico. Uno dei suoi punti di forza è la capacità di modellare e simulare fenomeni multifisici nell'ambito di molteplici discipline. I suoi moduli aggiuntivi potenziano ed espandono la piattaforma di simulazione mediante strumenti specifici per discipline come elettromagnetismo, meccanica strutturale, fluidodinamica, termica, acustica e applicazioni chimiche. Altri strumenti d'interfaccia permettono l'integrazione di COMSOL Multiphysics con tutti i principali software di calcolo tecnico, CAD e CAE presenti sul mercato (figura 18-19).

Per effettuare le simulazioni è stato utilizzato il portale Cresco Enea e le simulazioni effettuate in remoto sul Cluster di Portici con il programma FARO (figura 17).

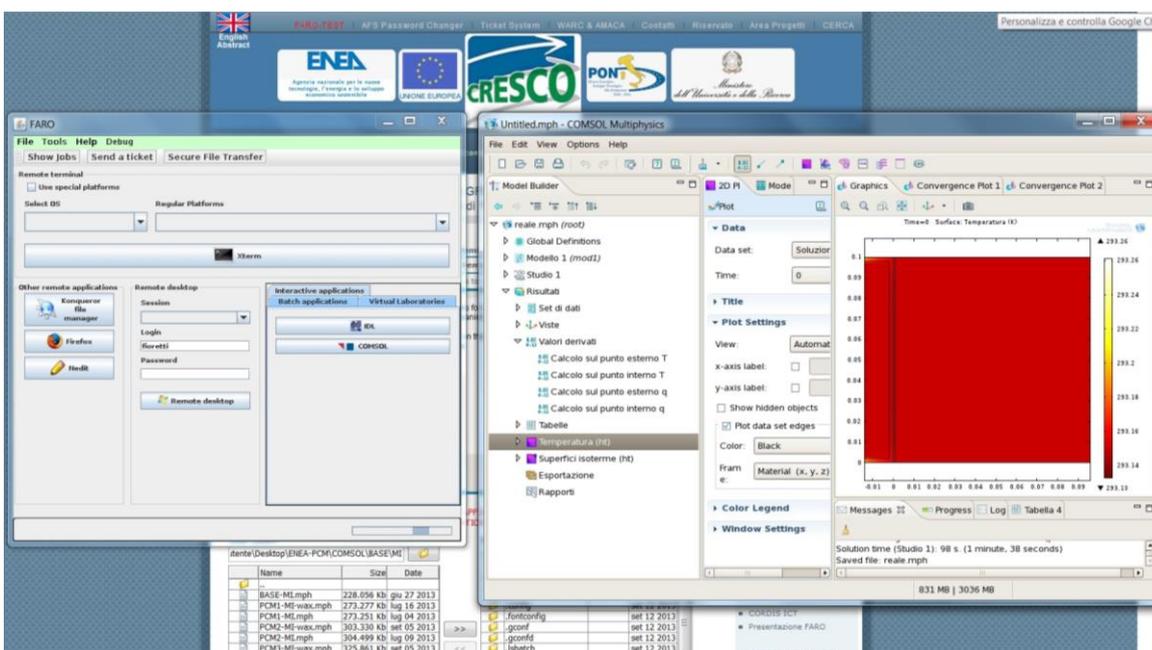


Figura 17 Schermata [www.cresco.enea.it](http://www.cresco.enea.it) - applicazione FARO

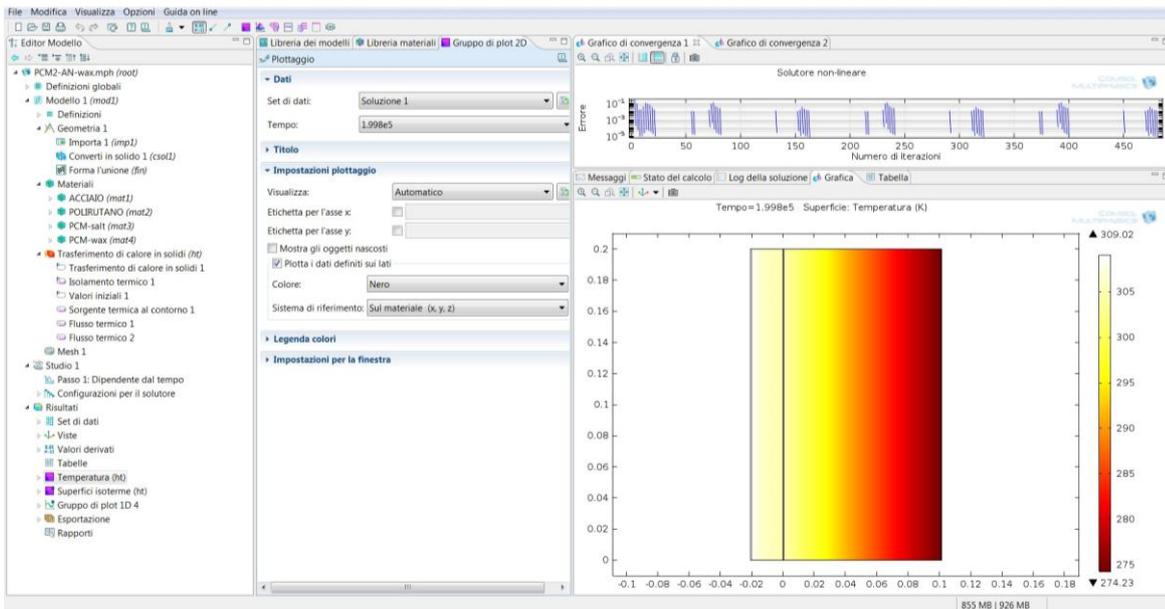


Figura 18 Schermata del Comsol Multiphysics

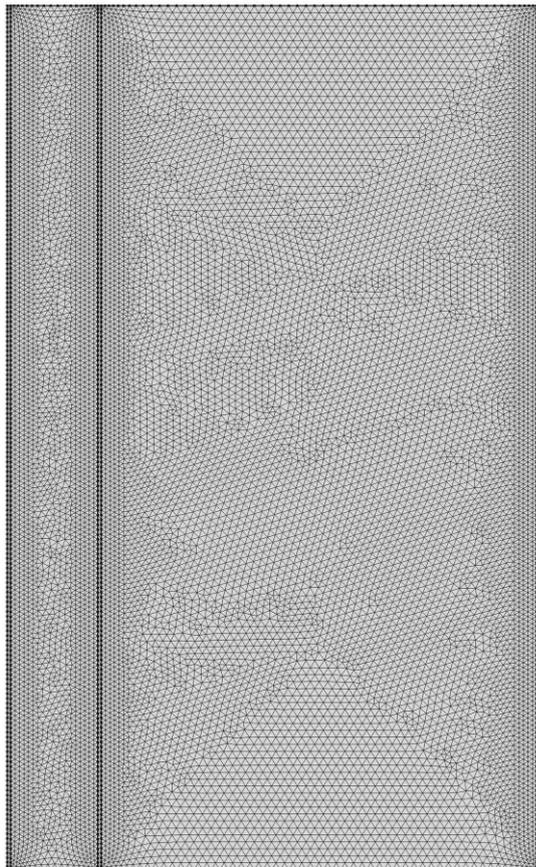
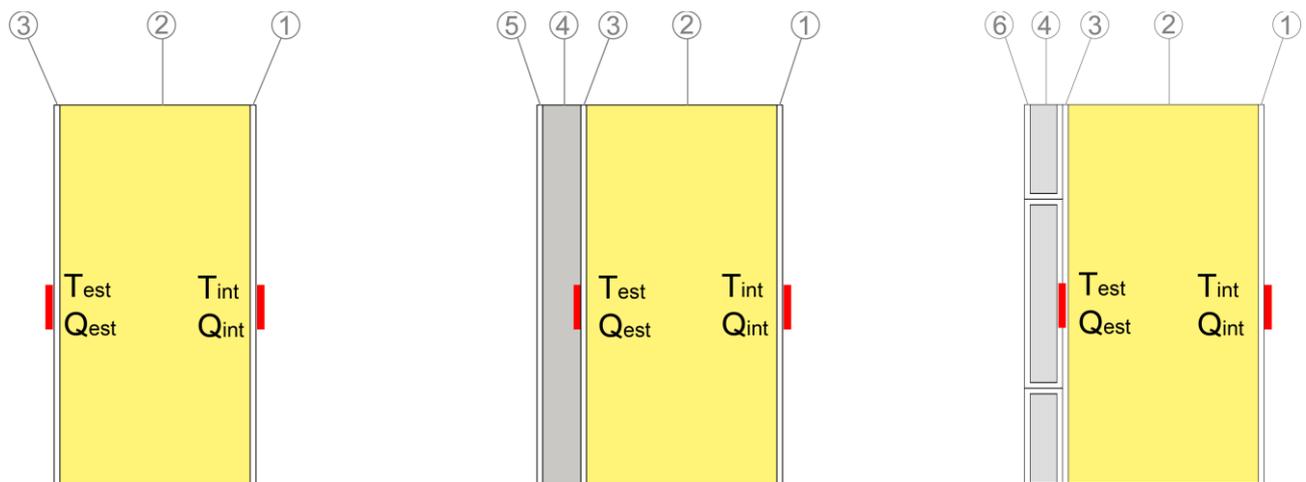


Figura 19 esempio di Mesh del modello 2D simulato.



strato	materiale	spessore [mm]
1	lamiera d'acciaio	1
2	poliuretano espanso	100
3	lamiera d'acciaio	1
4	PCM	10-20-30
5	lamiera d'acciaio	1
6	profilo in alluminio 100x20x2	-

Figura 20 schema delle stratigrafie analizzate (a) base (b) PCM teorico (c) PCM con packaging e dei parametri analizzati

Nella tabella 3 sono riportati i parametri termofisici relativi ai materiali utilizzati nelle strutture simulate. Per quanto riguarda i normali materiali (alluminio, acciaio, poliuretano) sono stati utilizzati i parametri presenti nelle normative UNI 10351 e UN 12524, mentre per i materiali a cambiamento di fase, sono stati utilizzati i dati dichiarati dal produttore per la paraffina (Rubitherm) e i dati sperimentali ottenuti da precedenti prove calorimetriche per i sali idrati (che tengono già conto del decadimento dopo un numero elevato di cicli).

materiale	temperatura di fusione [°C]	conducibilità termica [W/mK]	calore sensibile [J/kgK]	calore latente di fusione [J/kg]	densità [kg/m <sup>3</sup> ]
lega d'alluminio	-	200	900	-	2700
lamiera d'acciaio	-	50	475	-	7800
poliuretano espanso	-	0,032	1400	-	40
PCM – paraffina RT 35	35	0,2	2000	157000	880
PCM – sale idrato C32	32,5	1	3600	165000	1450

Tabella 3 Parametri fisici dei materiali utilizzati per la simulazione

Per la simulazione numerica sono state ipotizzate delle condizioni al contorno, gran parte prese dalle normative di riferimento per il settore delle costruzioni (figura 21-22-23-24). La temperatura interna invece è stata fissata a 0°C. In seguito nella Tabella 4 e nei successivi grafici, sono riportati i dati utilizzati e i relativi riferimenti normativi.

	temperatura dell'aria [°C]	resistenza superficiale (UNI 6946 [11])	altre sorgenti
interno	0	0,13 m <sup>2</sup> K/W flusso orizzontale 0,10 m <sup>2</sup> K/W flusso ascendente	nessuna
esterno	variabile relativa alla condizione limite estiva secondo la UNI 10349 [12]	0,04 m <sup>2</sup> K/W	radiazione solare - variabile relativa alla condizione limite estiva secondo la UNI 10349 [12]

Tabella 4 Condizioni al contorno

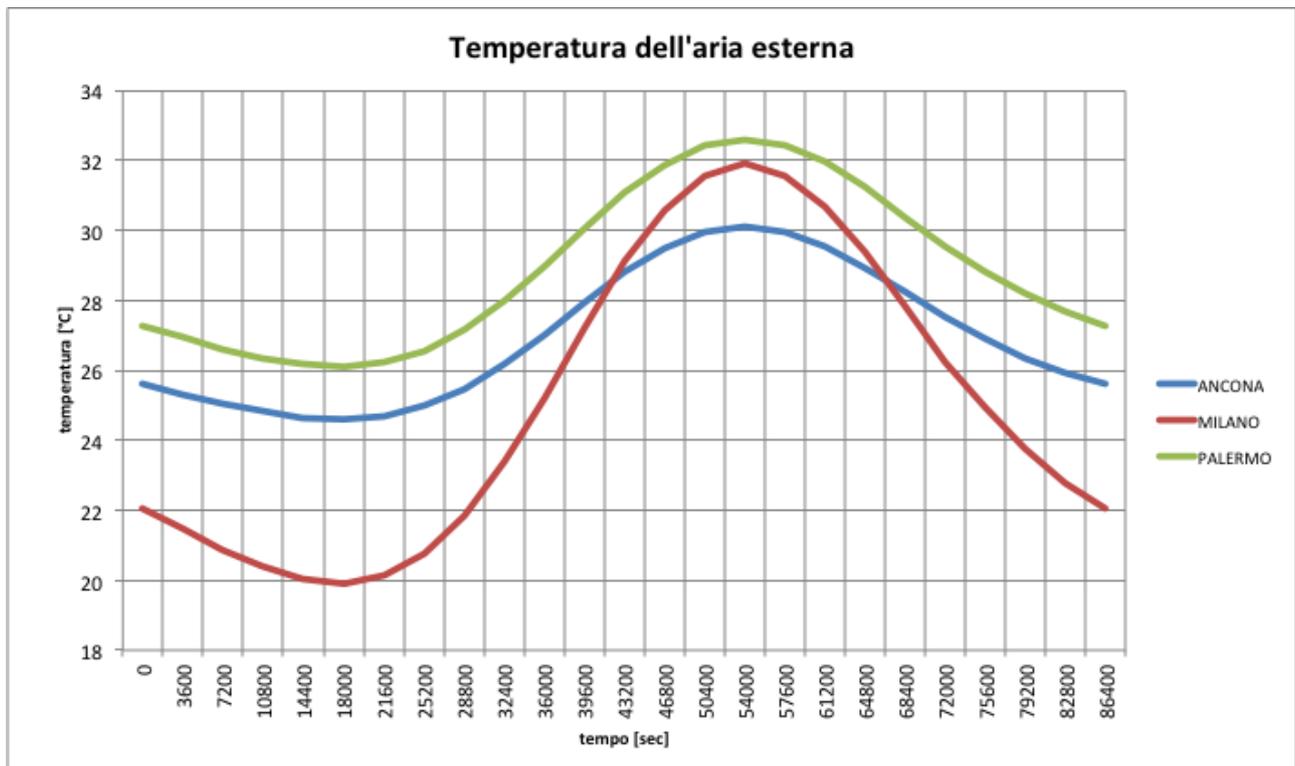


Figura 21 grafico delle temperature dell'aria esterna per le diverse località climatiche considerate.

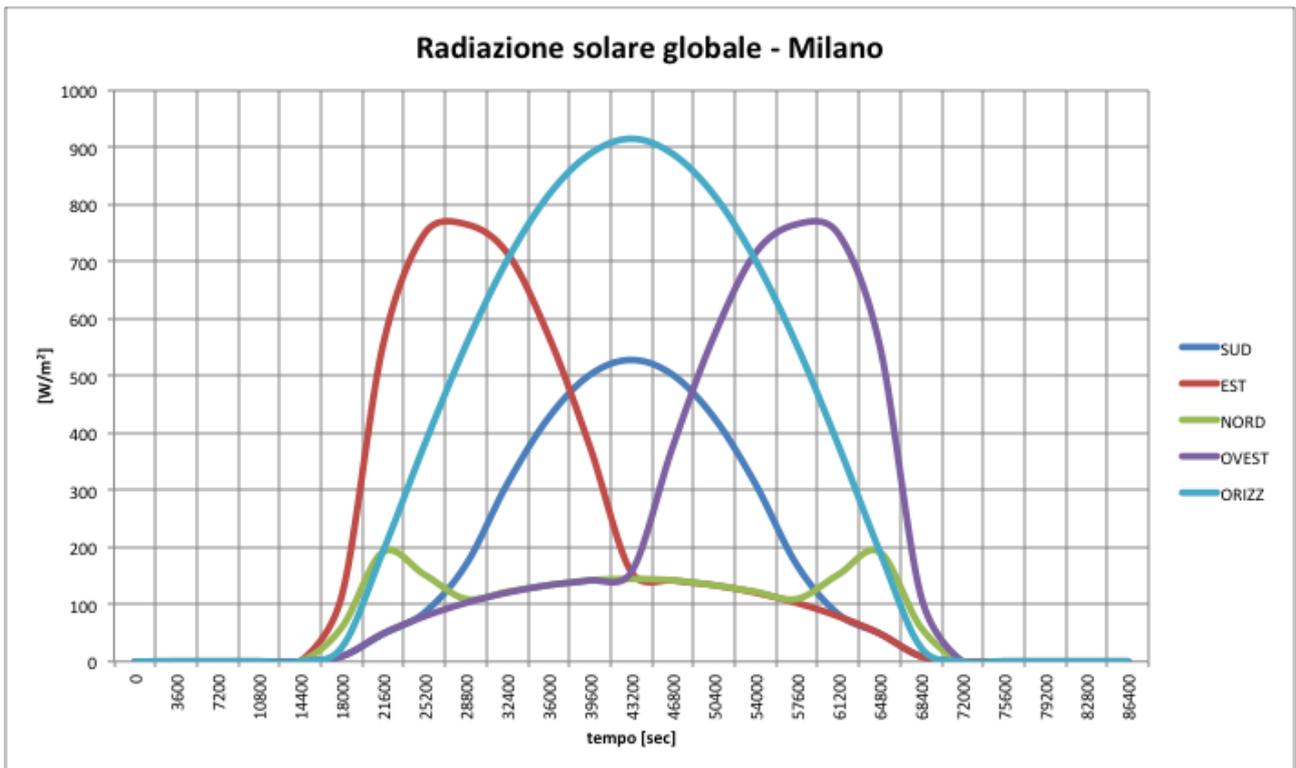


Figura 22 grafico dei valori di radiazione globale per Milano nelle diverse esposizioni.

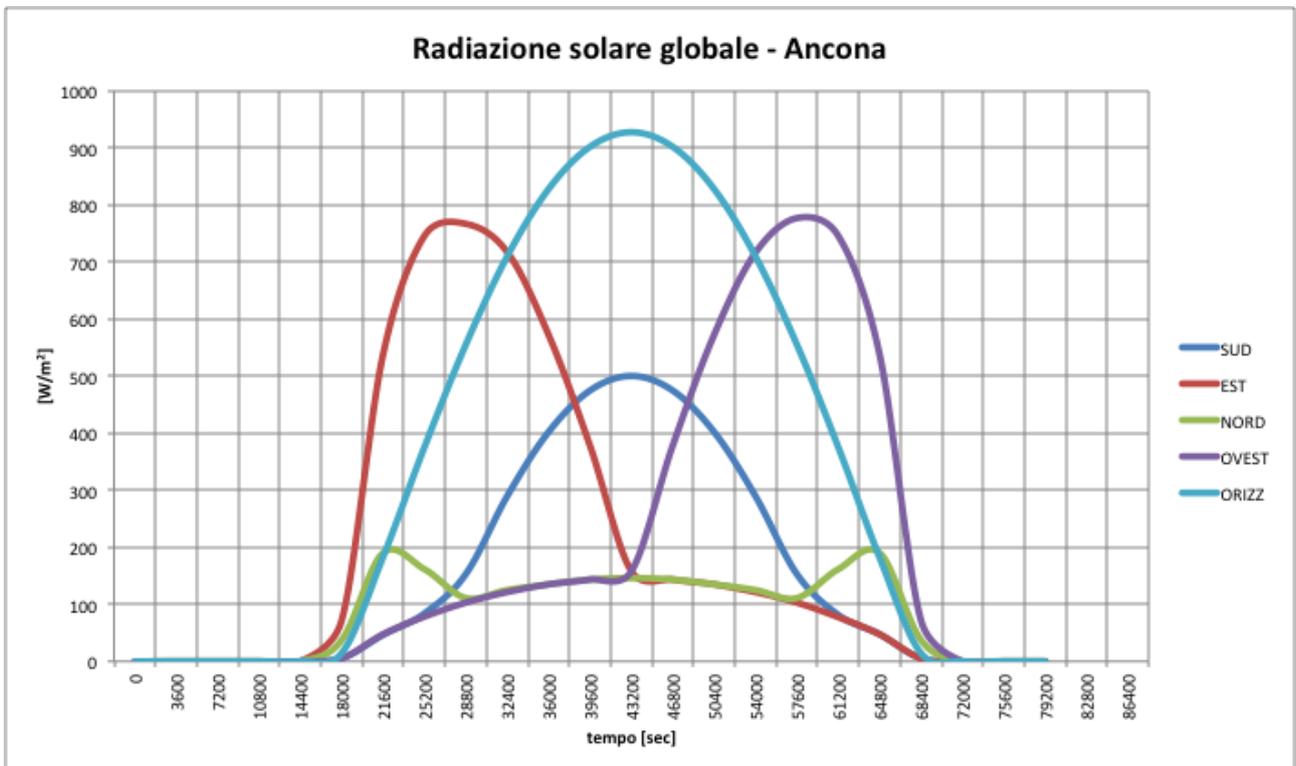


Figura 23 grafico dei valori di radiazione globale per Ancona nelle diverse esposizioni.

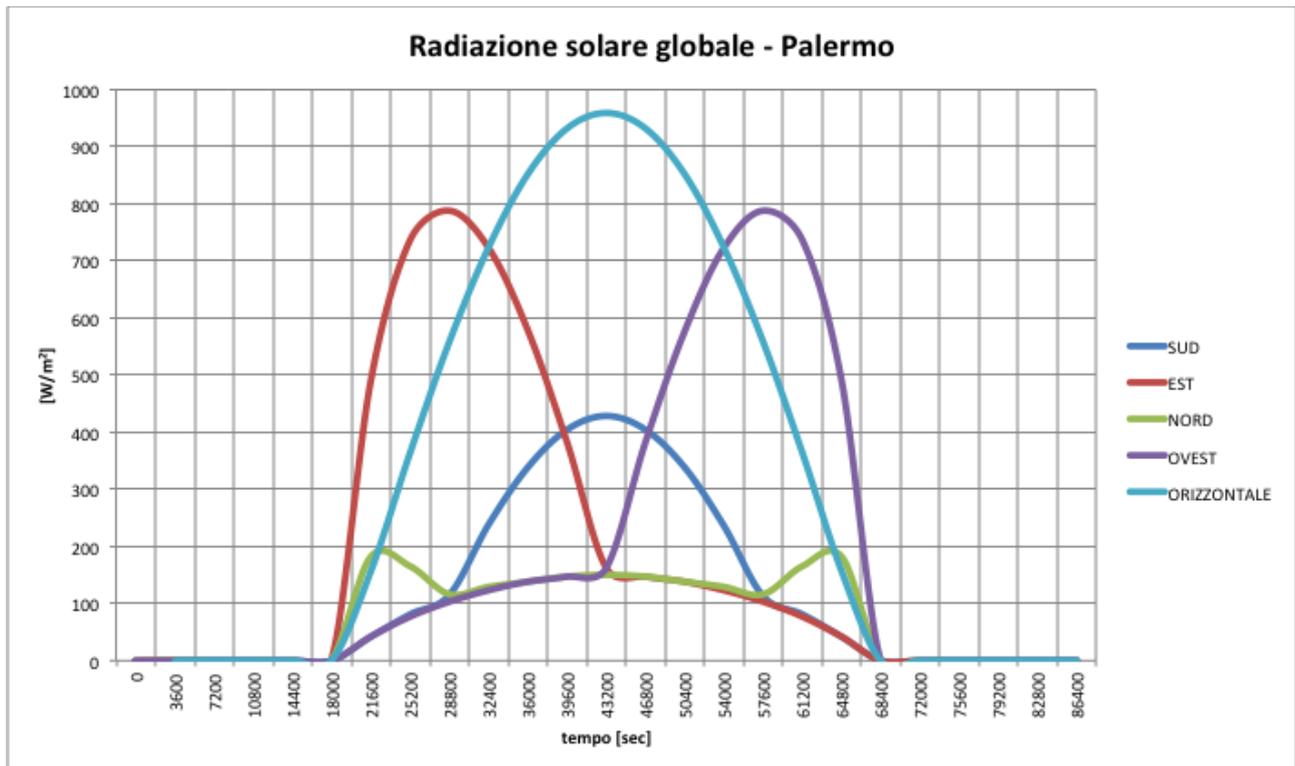


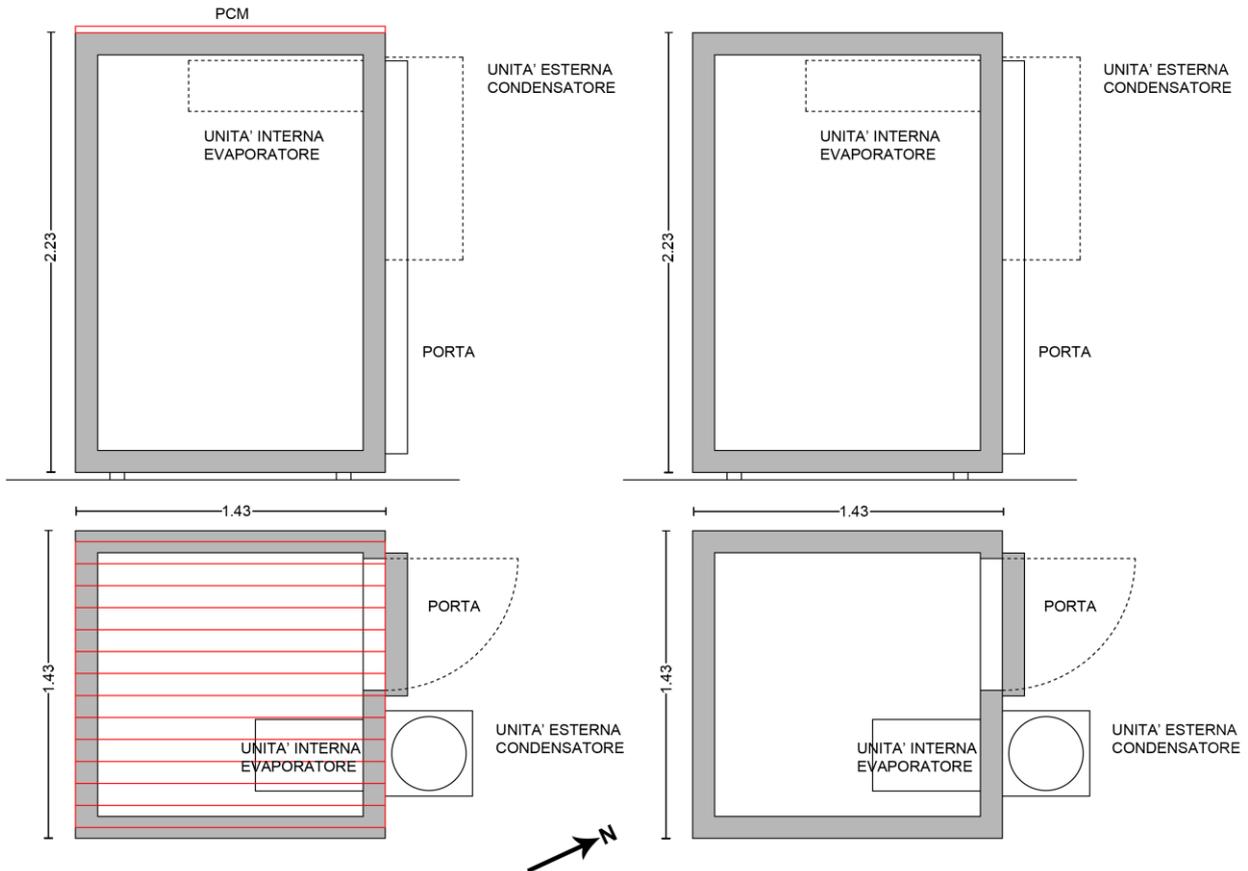
Figura 24 grafico dei valori di radiazione globale per Palermo nelle diverse esposizioni.

### 2.3 *Analisi sperimentale*

La fase sperimentale relativa al primo anno del programma di ricerca distribuito su un periodo di lavoro triennale è stata imperniata sulla evidenziazione del contributo al risparmio energetico nell'esercizio di celle frigorifere esposte ai carichi termici ambientali esterni. Per perseguire questo obiettivo, sono state acquisite due celle frigorifere, le cui caratteristiche verranno di seguito riportate, delle quali una è stata implementata sulla superficie esterna di un lato strategico dell'involucro con uno strato di materiale in passaggio di fase. Le due celle, successivamente alla messa a punto, sono state poste all'esterno per simulare le condizioni nelle quali operano le celle frigorifere poste a bordo di mezzi di trasporto. Le due celle sono state dotate di un sistema di monitoraggio dei parametri termici caratterizzanti il comportamento termodinamico delle stesse, mentre il rilievo dei parametri ambientali esterni è stato effettuato attraverso l'uso di una centralina climatica le cui caratteristiche, insieme con quelle del sistema di monitoraggio dei parametri caratterizzanti le celle verranno riportati più avanti. Il confronto tra le prestazioni energetiche delle due celle, sottoposte alle stesse condizioni ambientali esterne ha portato ad evidenziare il diverso comportamento, con il conseguente diverso consumo energetico.

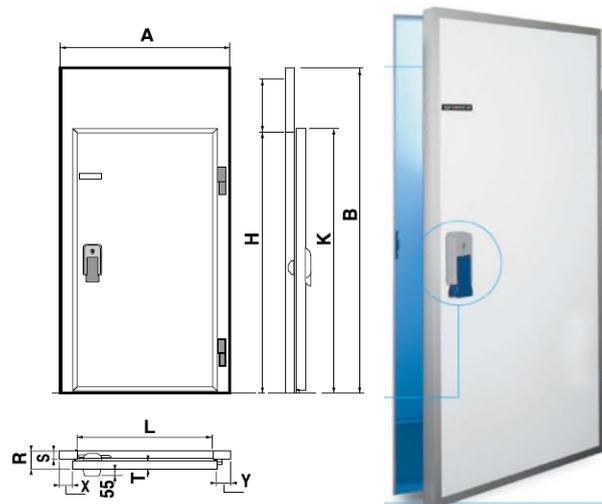
#### Descrizione della cella

La cella ha dimensioni totali esterne: 143cm X 143cm X 223cm (h), e forma e struttura evidenziate negli schemi seguenti (Figura 25)



**Figura 25** Planimetrie e sezioni delle celle frigorifere utilizzate per la sperimentazione

I lati della cella sono realizzati con una serie di pannelli modulari per pareti e soffitti prodotti con procedimento vacuum system (M.V.S.), realizzati in lamiera zincata 5/10 e plastificata atossica di colore bianco, isolati con schiume poliuretaniche iniettate con densità  $40\text{Kg/m}^3$ . Spessore del pannello: 10 cm. La cella è completa di pavimento carrabile ed è dotata di porta a tampone luce netta: 70 cm x 190 cm (h) (Figura 26)



**Figura 26** Schema e immagine della porta d'ingresso alla cella frigorifera

L'impianto frigorifero installato a bordo della cella è del tipo monoblocco Temp. 0/+8°C con rievaporazione dell'acqua automatica, potenza frigorifera 1140 W (Figura 27)



**Figura 27 immagine dell'impianto frigorifero**

Nella sequenza fotografica che segue di evidenziano le fasi del montaggio della cella ed i componenti della stessa (Figura 28)



Figura 28 sequenza della costruzione delle celle frigorifere

Come è possibile verificare osservando la figura 29, le due celle frigorifere sono state installate all'aperto, sulla terrazza del Laboratorio di Energetica Ambientale del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche. I due volumi sono stati messi parallelamente l'uno all'altro, con lo stesso orientamento, ad una distanza tale da evitare che reciprocamente o per azione di altri corpi sperimentali esistenti sulla terrazza stessa venissero gettate ombre su una o più superfici esterne delle celle. A poca distanza è stata installata anche una centralina climatica sulla quale sono presenti sensori idonei a monitorare la maggior parte dei parametri climatici (di seguito verranno riportate le caratteristiche dei sensori presenti).

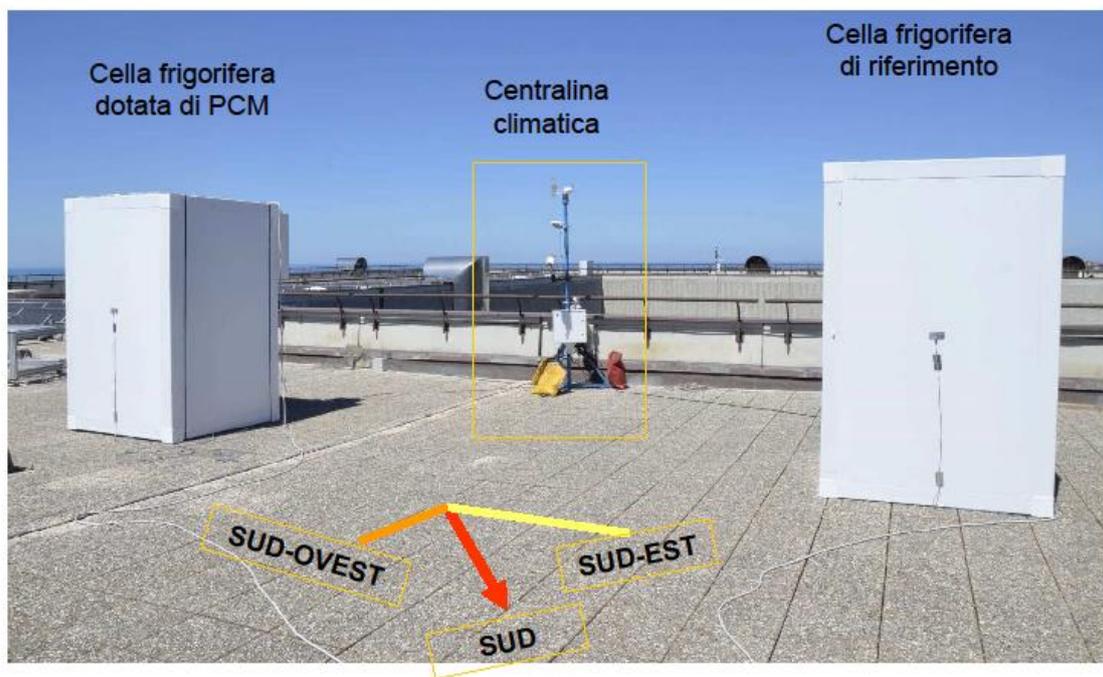


Figura 29 Disposizione delle celle frigorifere e della centralina climatica

### 2.3.1 Elementi contenenti PCM

Per la realizzazione dello strato di PCM da applicare alla cella frigorifera sono stati realizzati degli elementi in alluminio costituiti da un profilato estruso da 100x20 mm spessore 2 mm, chiuso alle estremità con lamiera in alluminio saldata, successivamente riempiti con paraffina attraverso il foro realizzato sulla faccia superiore. La filettatura realizzata sul foro ha permesso di sigillare il contenitore con un apposito tappo a vite (Figura 30). I contenitori sono stati appoggiati affiancati sulla copertura di una delle celle e tenuti insieme e a contatto da due nastri (Figura 31).

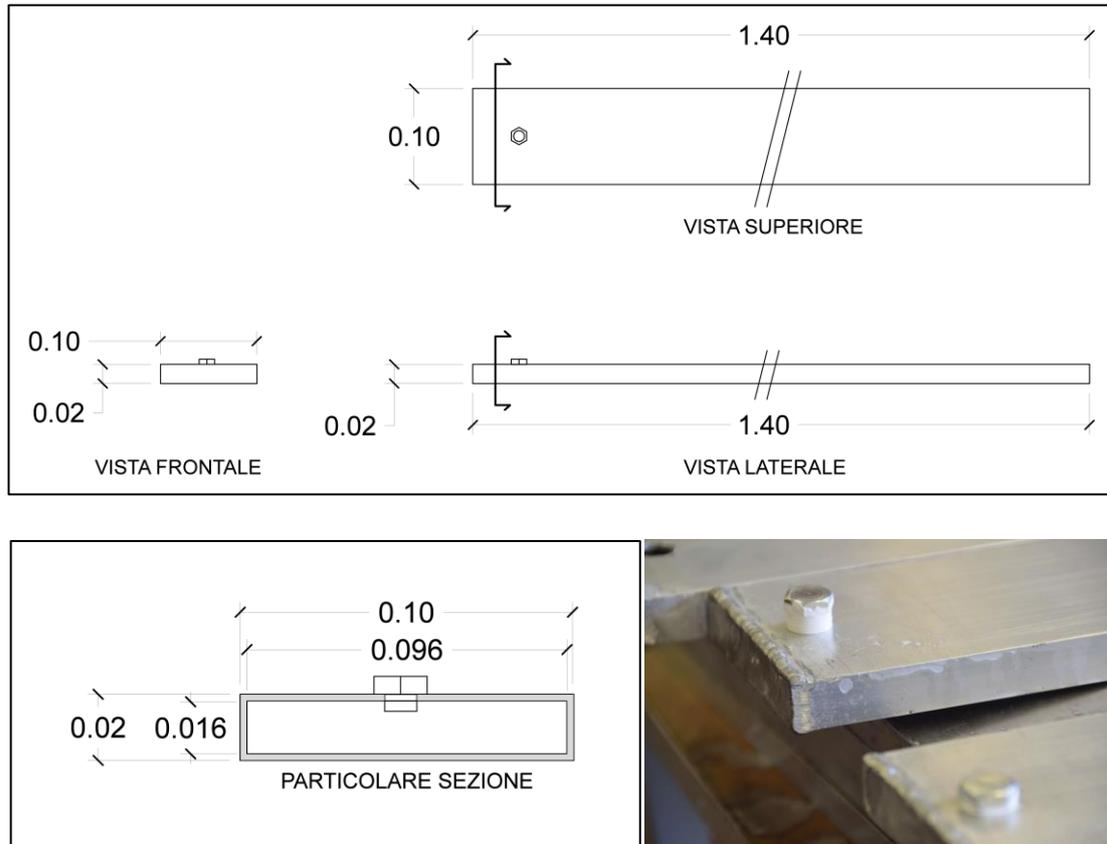


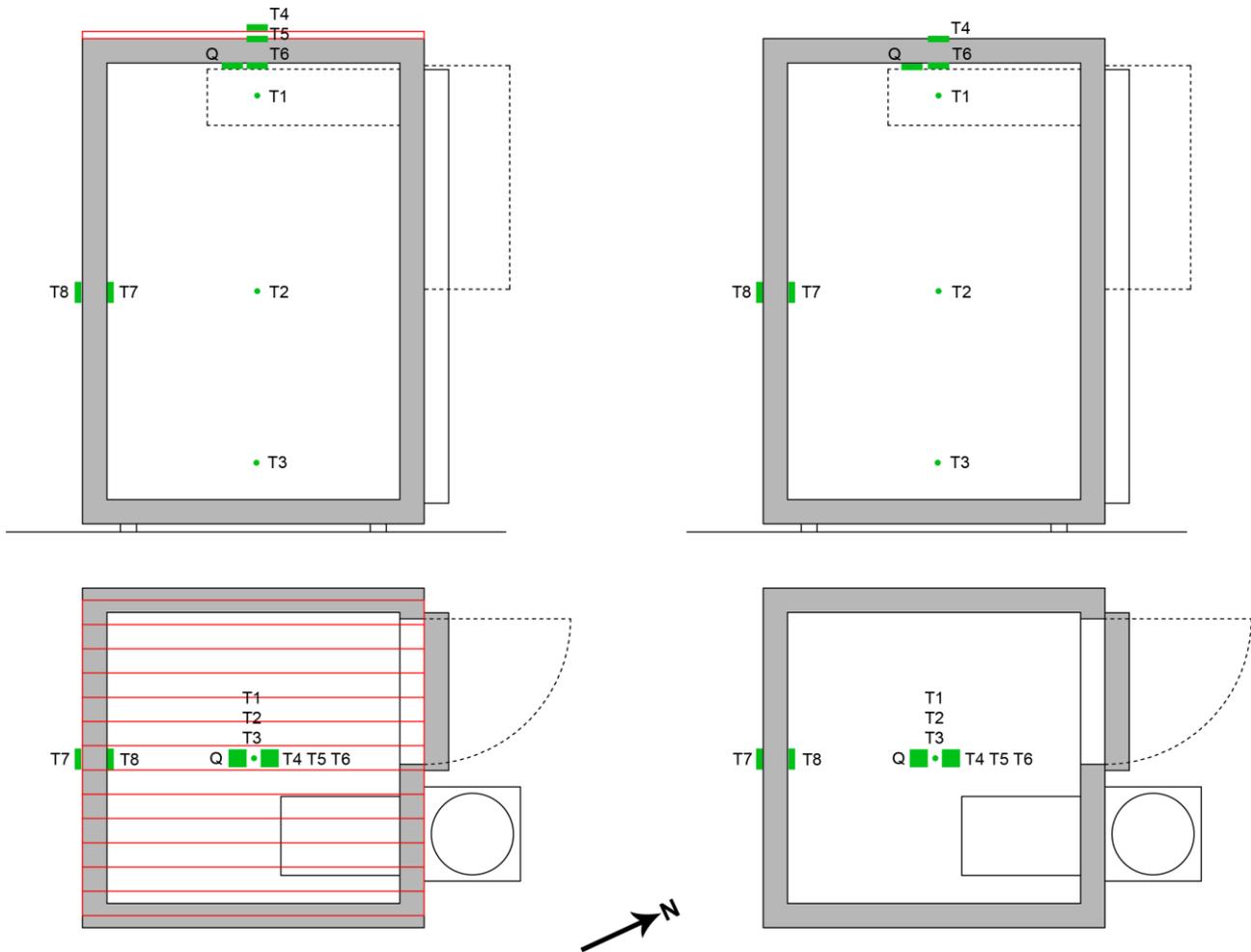
Figura 30 Disegni e particolari del sistema di contenimento utilizzato per la sperimentazione



**Figura 31 immagine della copertura con gli elementi contenenti PCM**

### 2.3.2 Sistema di monitoraggio

Il sistema di monitoraggio è stato concepito, realizzato, messo a punto ed utilizzato per misurare e registrare i dati relativi ai parametri termici che caratterizzano sia il comportamento termodinamico del Phase Change Material sia l'influenza del PCM sulle condizioni ambientali interne alla cella frigorifera. La Figura 32 mostra la posizione delle sonde di temperatura (termoresistenze indicate con la lettera t seguita da numero a pedice) sulle sezioni trasversali della cella con PCM a sinistra e senza PCM a destra. Sotto nella figura si possono osservare le posizioni di sonde di contatto (termoresistenza a piastra) e del termoflussimetro (indicato con la lettera Q sulle superfici interne ed esterne della copertura e del fondo della cella. Nella Fig è mostrata la termoresistenza, opportunamente schermata, fissata sulla superficie esterna del contenitore del PCM.



**Figura 32 Planimetrie e sezioni delle celle con il sistema di monitoraggio**

L'analisi ambientale è stata svolta mediante l'utilizzo di una stazione climatica sistemata in prossimità delle celle frigorifere monitorate.

Questa centralina possiede un sistema di acquisizione LSI LASTEM BABUC ABC modello DGB 106, caratterizzato da 8 ingressi analogici e da 2 ingressi digitali. Il BABUC ABC possiede, per l'acquisizione dei dati, una memory card di 640 kByte del tipo PC card (PCMCIA), e presenta un display ed una tastiera per il comando. Per la trasmissione dei dati meteorologici memorizzati e per la programmazione della centralina, è possibile collegare un PC utilizzando una delle due uscite RS 232 e utilizzando il software di gestione fornito in dotazione con la stessa.

Alla centralina sono collegati quattro diversi strumenti per il rilevamento meteorologico, ognuno di questi legge e trasmette informazioni su grandezze di diversa natura:

- Radiometro globale
- Radiometro diretto
- Sensore combinato velocità – direzione del vento
- Termoigrometro

Il radiometro globale è un sensore per la misura della radiazione solare globale, cioè quella ricevuta direttamente dal disco solare nonché quella riemessa dall'atmosfera e dalla copertura nuvolosa. La grandezza viene restituita in  $W/m^2$ . Il radiometro installato in questa centralina meteo è un modello CM 6B

prodotto dalla ditta LSI LASYSTEM (Figura 33). L'elemento sensibile è costituito da una termopila, cioè più termocoppie in serie. Le caratteristiche tecniche sono riportate in Tabella 5.

Elemento sensibile	Termopila
Campo spettrale	300..1100nm
Campo di misura	<2000 W/m <sup>2</sup>
Uscita elettrica radiazione	normaliz.
Incertezza totale	<5%
Tempo di risposta	18 sec.
Zero off-set dovuto al cambiamento di temperatura (5°C/ora)	<±4 W/m <sup>2</sup>
Errore direzionale	<±20 W/m <sup>2</sup>
Non linearità	<±1,2 W/m <sup>2</sup>
Non stabilità	±1% sensitività
Deriva termica sulla sensitività	<±4% sensitività
Errore di tilt	±1% (1000 W/m <sup>2</sup> )
Consumo	0,7 W

Tabella 5 Caratteristiche tecniche del radiometro globale

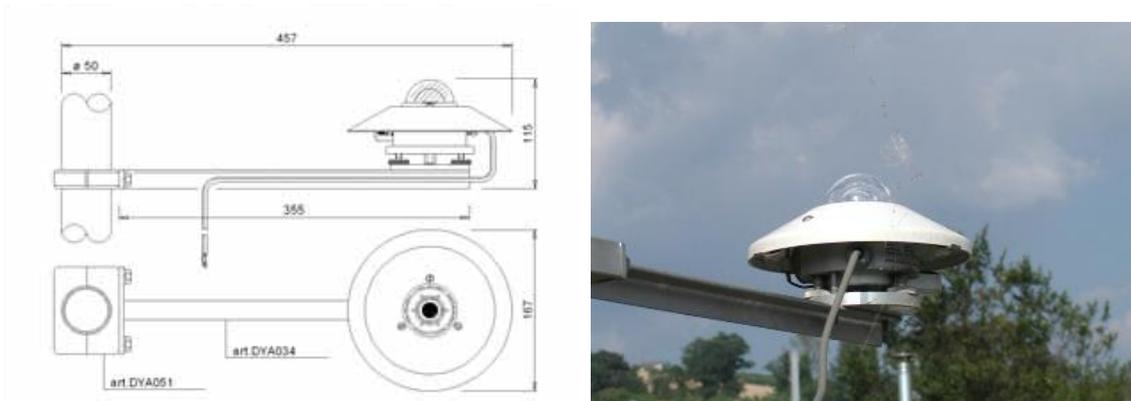
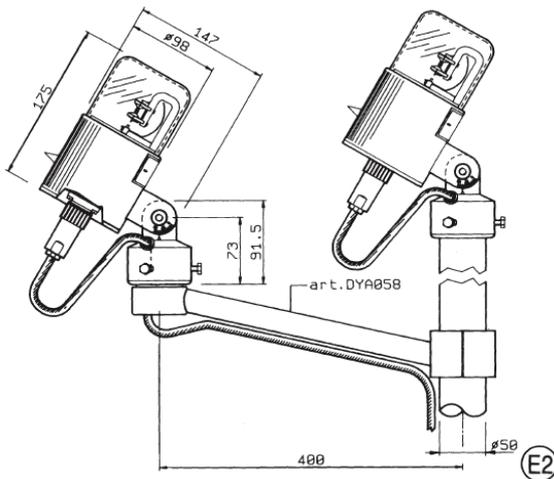


Figura 33 disegno e immagine del radiometro globale

Il radiometro diretto senza puntamento misura la durata dell'insolazione (riferita ad una certa soglia) e la radiazione diretta dal sole. La misura avviene nel campo del visibile e dell'infrarosso, il principio di funzionamento è il seguente: un complesso di sensori rileva l'illuminamento di una piccola sfera che riceve la luce proveniente da una fascia anulare di cielo alta 90°, avente come equatore il cerchio equinoziale del luogo. Una banda rotante intercetta periodicamente il sole; per ogni rotazione lo strumento definisce le due condizioni di radianza della fascia con e senza l'apporto diretto del disco solare e ne calcola la differenza; questa corrisponde con buona approssimazione al valore della radiazione diretta. La grandezza rilevata viene restituita in W/m<sup>2</sup>. Lo strumento fornisce inoltre lo stato dell'insolazione, definita presente quando la radiazione diretta è maggiore di 120 W/m<sup>2</sup>. Il sensore montato è un C300R della LSI LASTEM (figura 34): il suo elemento sensibile è costituito da fotodiodi. Le caratteristiche tecniche sono riportate in Tabella 6.

Elemento sensibile	Fotodiodi
Latitudini di funzionamento	0..60°
Campo spettrale	300..1100nm
Campo di misura	1500 Wm-2
Uscita elettrica radiazione	normaliz.
Tolleranza	5%+5 Wm-2
Non linearità	<1,5%
Deriva termica	<2% (-10 +40°C)
Temp. operativa	0 .. +60°C
Temp.operativa (con risc.)	-30 .. +60°C (in assenza di ghiaccio)
Velocità di rotazione banda	1 rps
Uscita elettrica insolazione	on/off TTL comp.
Regolazione soglia insolazione	100... 200Wm-2
Consumo	0,7 W
Riscaldatore anticondensa	1 W
Riscaldatore di sbrinamento	20 W
Termostato sbrinamento	5..20°C

**Tabella 6 Caratteristiche tecniche dell'eliofanometro**



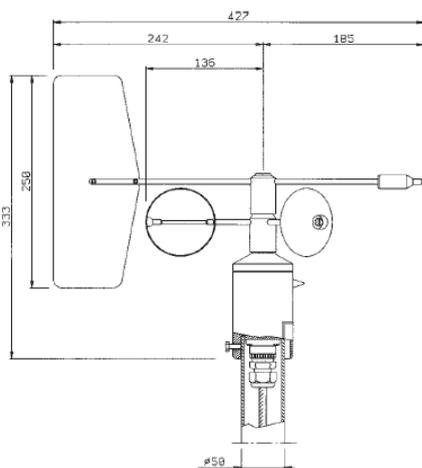
**Figura 34 disegno e immagine dell'eliofanometro.**

Lo strumento per la misurazione della velocità del vento e della sua direzione è un COMBI SD della LSI LASTEM (figura 35), costituito da un elemento rotante a tre coppe per la determinazione della velocità e da una banderuola con cui si determina la direzione del vento. L'anemometro sfrutta come trasduttore di velocità un disco optoelettronico mentre per la traduzione della direzione utilizza un potenziometro a filo da 2000 Ohm. Esso riesce a determinare la velocità del vento in un campo che va da 0 a 60 m/s, con una

soglia di acquisizione pari a 0,38 m/s. La velocità rilevata viene restituita in m/s, mentre la direzione con il valore dell'angolo in gradi rispetto al nord. Le caratteristiche tecniche sono riportate in Tabella 7.

Principio di funzionamento	Anemometro a 3 coppe e banderuola
Sensore di velocità	Disco optoelettronico
Sensore di direzione	Potenziometro a filo da 2000 Ohm
Limite di danneggiamento	>75 ms-1
Temperatura operativa	-30°+70°C
Campo di misura	÷ 60 ms-1
Soglia	0,38 ms-1
Tempo di risposta	63% a 5 ms-1) 0,8 s
Percorso di ritardo a 5 ms	1 4,0 m
Risoluzione (integrazione = 1s)	0,05 ms-1
Linearità & Accuratezza	0,1 m/s+1%VL (readout)
Campo di misura	0 ÷ 360°
Soglia	0,15 ms-1
Risoluzione	0,1°
Accuratezza	1% FS (Full scale)
Linearità integrale	0,5%

**Tabella 7 Caratteristiche tecniche dell'anemometro**

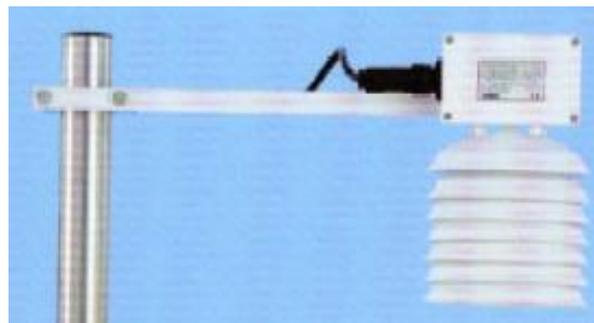


**Figura 35 disegno e immagine dell'anemometro**

Come sensore per la misurazione della temperatura dell'aria e dell'umidità esterna è stato utilizzato un termoisigrometro LSI DMA 570 (figura 36). L'elemento termosensibile è una termoresistenza PT 100, mentre l'elemento igrosensibile è una sonda igrocapacitiva. Gli elementi sensibili sono protetti dalla radiazione solare incidente per mezzo di un doppio schermo antiradiante. Quello interno contiene gli elementi sensibili ed in esso scorre aria a ventilazione naturale; quello esterno è un'ulteriore protezione costituita da una serie di alette bianche ad altro potere riflettente. Il valore della temperatura viene restituito in gradi Celsius mentre l'umidità relativa in percentuale. Le caratteristiche tecniche sono riportate in Tabella 8.

	temperatura	Umidità
Campo di misura	-30÷70°C, -50÷50°C 0÷100°C	0÷100%
Elemento sensibile	Pt100 1/3 DIN-B	Capacitivo
Accuratezza (Riproducibilità+ Isteresi)	±0,1°C (0°C)	1,5% (5÷95%, 23°C) * 2% (<5>95%, 23°C)
Accuratezza elettronica	±0,15°C	
Risoluzione	0,06°C	0,5%
Tempo di risposta	10 s	10 s
Stabilità a lungo termine		<1% anno/
Deriva termica		Max +-1,5%
Temperatura operativa	-40°÷95°C	-40°÷95°C
Uscita elettrica	analogica	analogica

**Tabella 8 Caratteristiche tecniche del termoigrometro**



**Figura 36 disegno e immagine del termoigrometro**

Per la misura del flusso termico entrante dalla superficie di copertura sono stati utilizzati termoflussimetri Lsi lastem BSR240 (**figura 37**), posizionati sulla superficie interna della struttura. Le caratteristiche tecniche vengono riportate in Tabella 9.

Campo	?
Incertezza (tot.12 ore misura)	5% VL/reading + 0,4 Wm2
Sensibilità (nominale)	50 µV/Wm2
Risoluzione	0,1 W/m2
Elemento sensibile	Termopila
N°canali utilizzati	n.1
Limiti ambientali	-30+70°C
Norme	ISO9869, ASTM C1046, ASTM 1155

Dimensioni	Diam. 80 mm
Cavo	L. 5 m

**Tabella 9** Caratteristiche tecniche dei termoflussimetri



**Figura 37** immagine del termoflussimetro

Per la misurazione della temperatura dell'aria e superficiale all'intradosso delle superfici di copertura, sono state utilizzate delle sonde PT 100, a contatto per la misurazione della temperatura superficiale e schermate da un cilindro di acciaio, per la misura della temperatura dell'aria all'interno degli ambienti (Figura 38)



**Figura XX** termoresistenze per la misura della temperatura dell'aria e per la misura della temperatura superficiale.

Per l'acquisizione, la conversione e la memorizzazione delle grandezze sono stati utilizzati degli acquisitori DATATAKER DT 500 (figura 39), uno per ogni ambiente monitorato. Il datataker è un dispositivo per la acquisizione dei valori da rilevare attraverso dei sensori. Questo dispositivo consente di leggere, convertire, memorizzare e trasmettere i dati, relativi alle misurazioni dei valori che vogliamo acquisire. Questo dispositivo è predisposto per leggere grandezze di diversa natura, sia di tipo analogico, che digitale. Il datataker utilizzato per la sperimentazione il DT 500 serie 3 presenta la possibilità di avere 10 entrate di tipo analogico a 4 conduttori e di 4 ingressi-uscite digitali. I dati memorizzati vengono scaricati su un PC attraverso la memory card, utilizzando il software in dotazione Delogger, oppure collegandosi al datataker attraverso un cavo seriale collegato ad una porta COMMS e scaricare i dati memorizzati nella memoria interna.



**Figura 39 immagine del Datataker DT 500**

Il monitoraggio è stato effettuato durante il periodo estivo per 4 settimane consecutive, caratterizzate da condizioni climatiche variabili. Durante la prima settimana il funzionamento della cella è stato testato in assenza dell'impianto di condizionamento, mentre nelle 3 settimane successive l'impianto di condizionamento è stato attivato e la temperatura dell'aria interna impostata a 0°C.

Nelle pagine seguenti vengono riportati i grafici dei dati rilevati suddivisi in:

- Temperatura dell'aria esterna
- Umidità dell'aria esterna
- Radiazione globale
- Velocità del vento
- Temperature dell'aria interna
- Temperature sulla superficie di copertura
- Flussi termici attraverso la copertura

## 2.4 Risultati

### 2.4.1 Analisi numeriche

Le analisi numeriche effettuate hanno dato i primi risultati incoraggianti riguardo agli effetti positivi determinati dall'applicazione del PCM e un'idea sommaria degli spessori di materiale utile all'assorbimento della radiazione solare esterne.

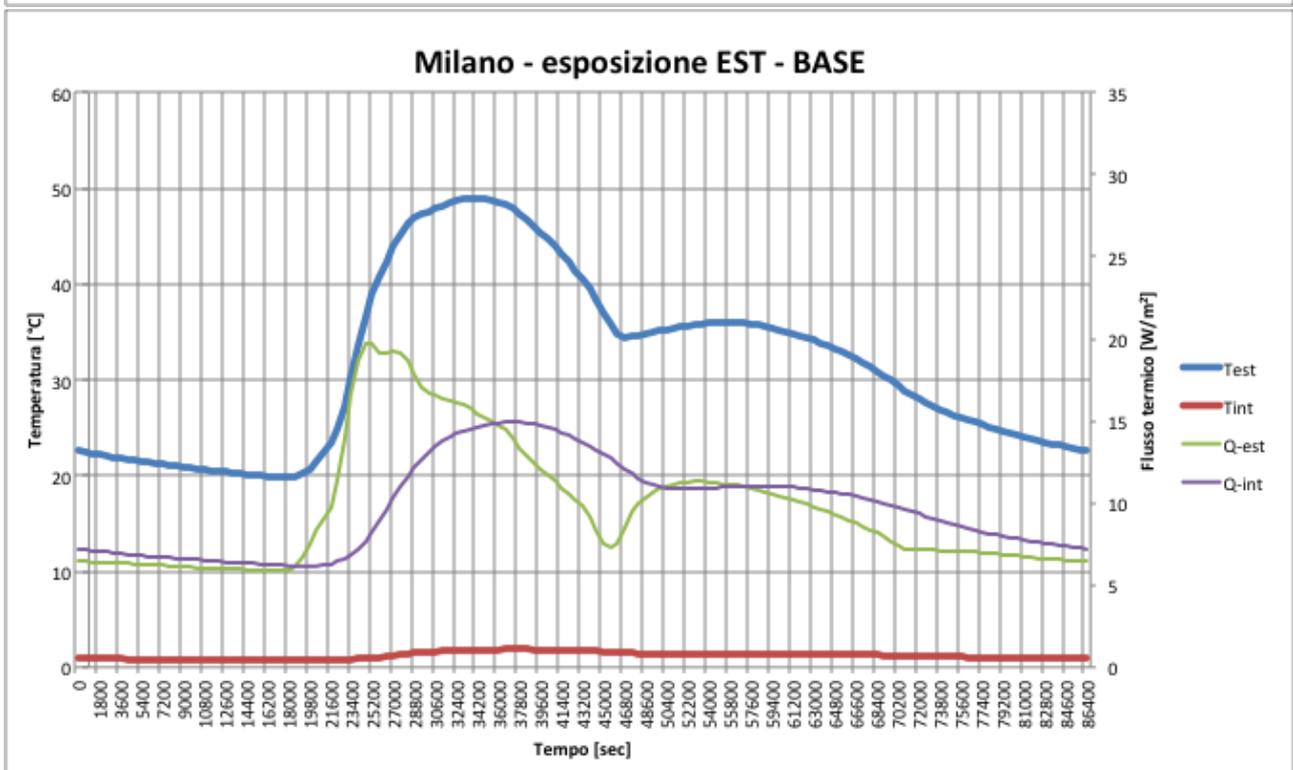
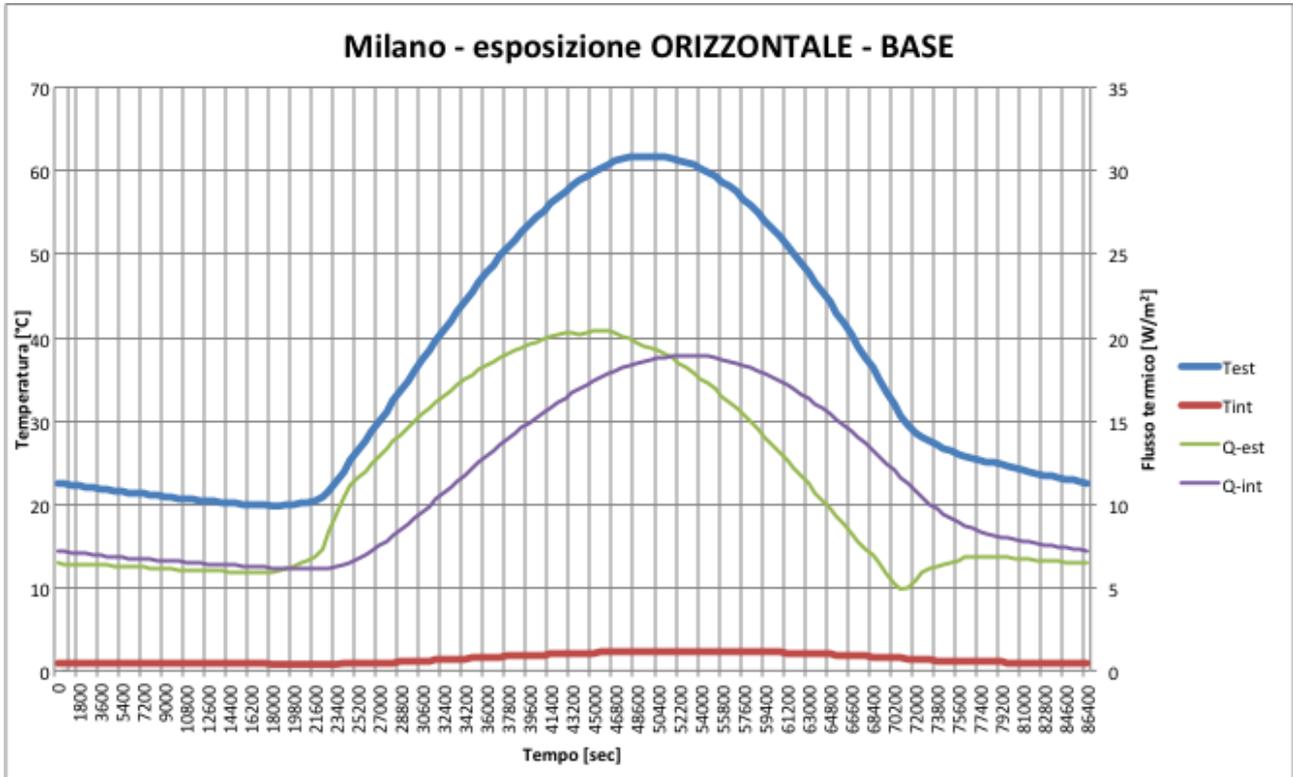
Dalle analisi numeriche effettuate si può notare come tutti i picchi di flusso diurni caratteristici del pannello con qualsiasi PCM siano sfasati temporalmente rispetto al picco relativo al flusso termico passante attraverso il pannello base. Perdi più gli stessi picchi sono più bassi sul piano e le aree sottese alle curve più contenute rispetto a quelle del pannello base. Tutto ciò conferma con variazioni fra PCM e PCM e con l'applicazione di spessori diversi, la bontà della soluzione al fine della riduzione dei consumi energetici. Infatti a minori flussi entranti, nel caso dell'esempio quelli entranti da una delle pareti verticali della cella con esposizione Sud, corrisponde una minore energia necessaria a mantenere la bassa temperatura dell'aria e dei materiali della cella, ma anche una minore temperatura media radiante delle superfici interne della cella. A questo corrisponde quindi una minore energia elettrica utilizzata per il funzionamento della macchina frigorifera che produce la refrigerazione interna.

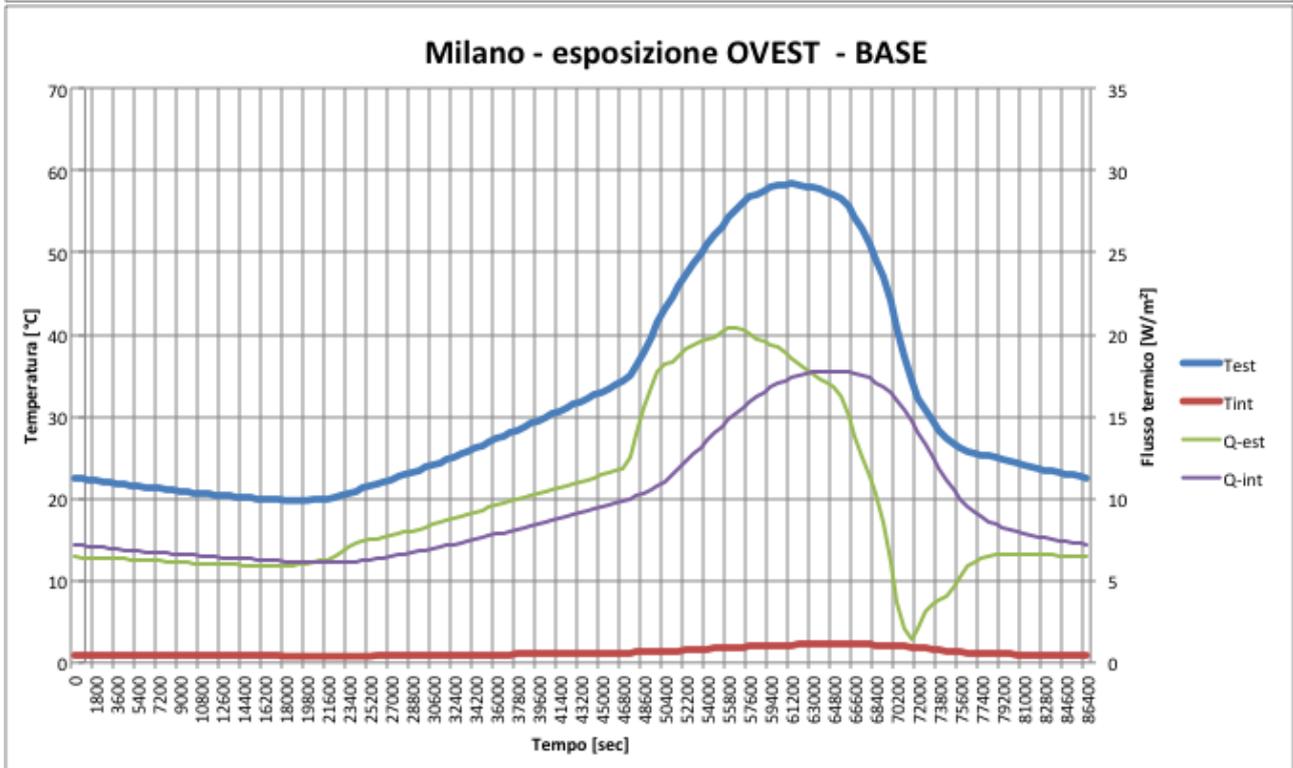
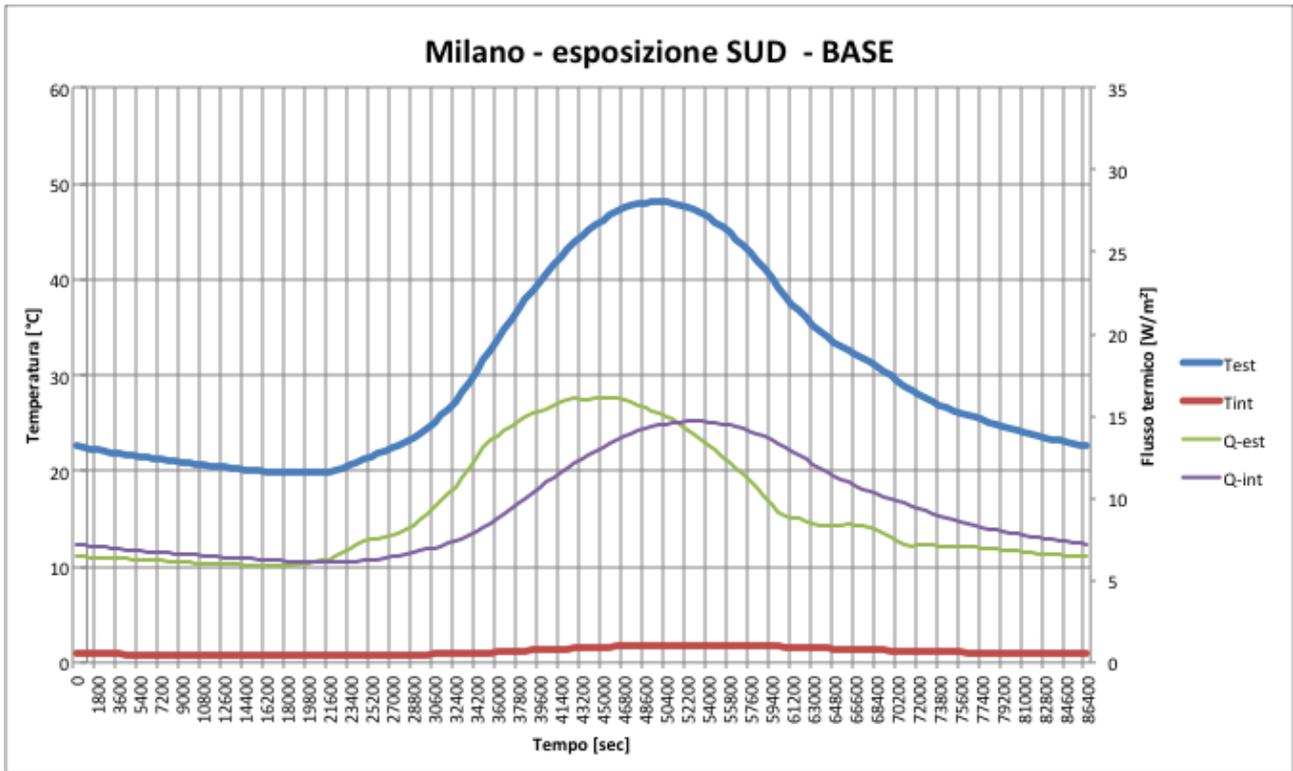
Dai diversi grafici è possibile valutare quale sia la quantità di PCM, in termini di spessore dello strato, necessaria per ciascuna esposizione e località climatica.

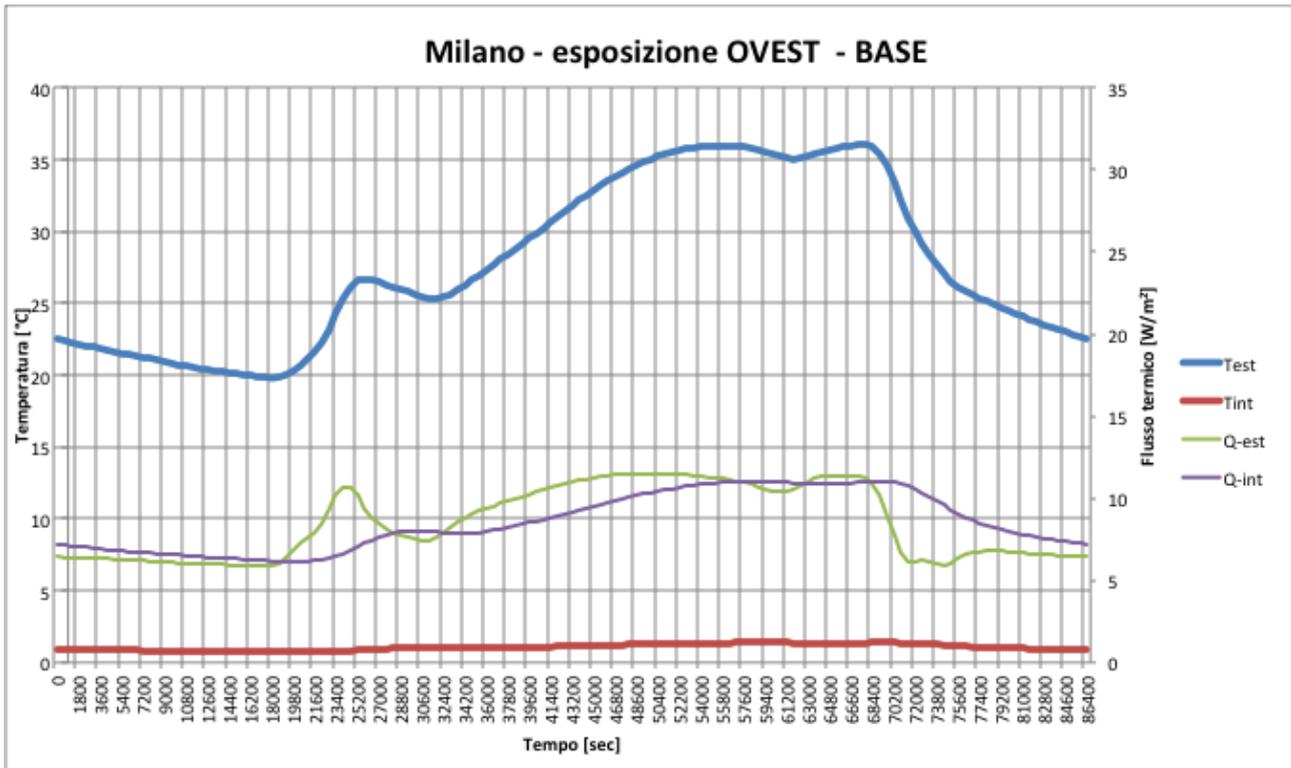
Dai grafici si evince inoltre che la copertura risulta essere l'esposizione critica, dove nei diverse ipotesi considerate, il PCM inserito arriva completamente a fusione, limitando l'effetto smorzante alla prima parte della giornata. Seppur con evidenti differenze il comportamento nelle diverse località climatiche è tendenzialmente simile, denotando però criticità maggiori nella località climatica di Palermo, dovuta in parte alla temperatura ed in parte all'irraggiamento solare.

Un'altra considerazione importante riguarda la scelta dei materiali a cambiamento di fase, infatti con spessori di 3 cm risultano sufficienti (a parte la copertura) al mantenimento delle temperature per l'intera giornata e nelle ore notturne al rilascio completo dell'energia accumulata, quindi al ritorno allo stato solido.

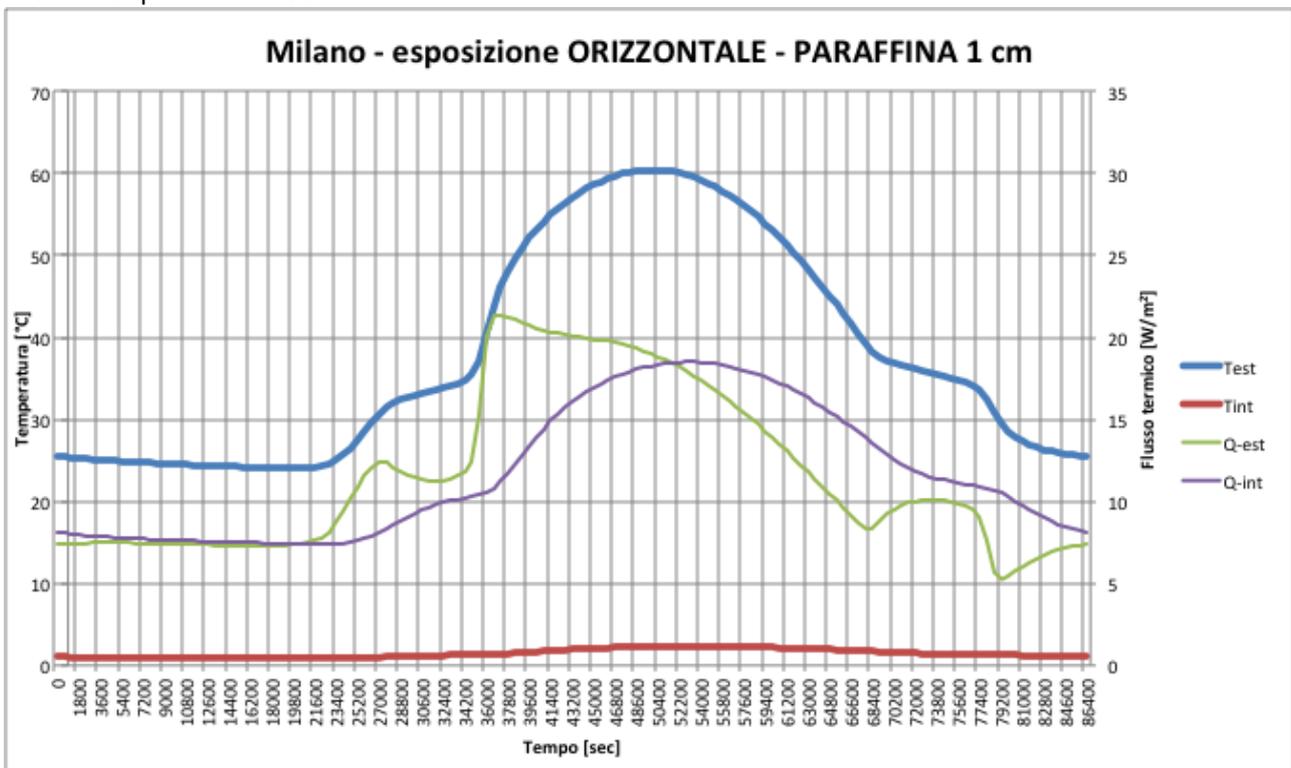
LOCALITÀ CLIMATICA: MILANO  
MODELLO: BASE

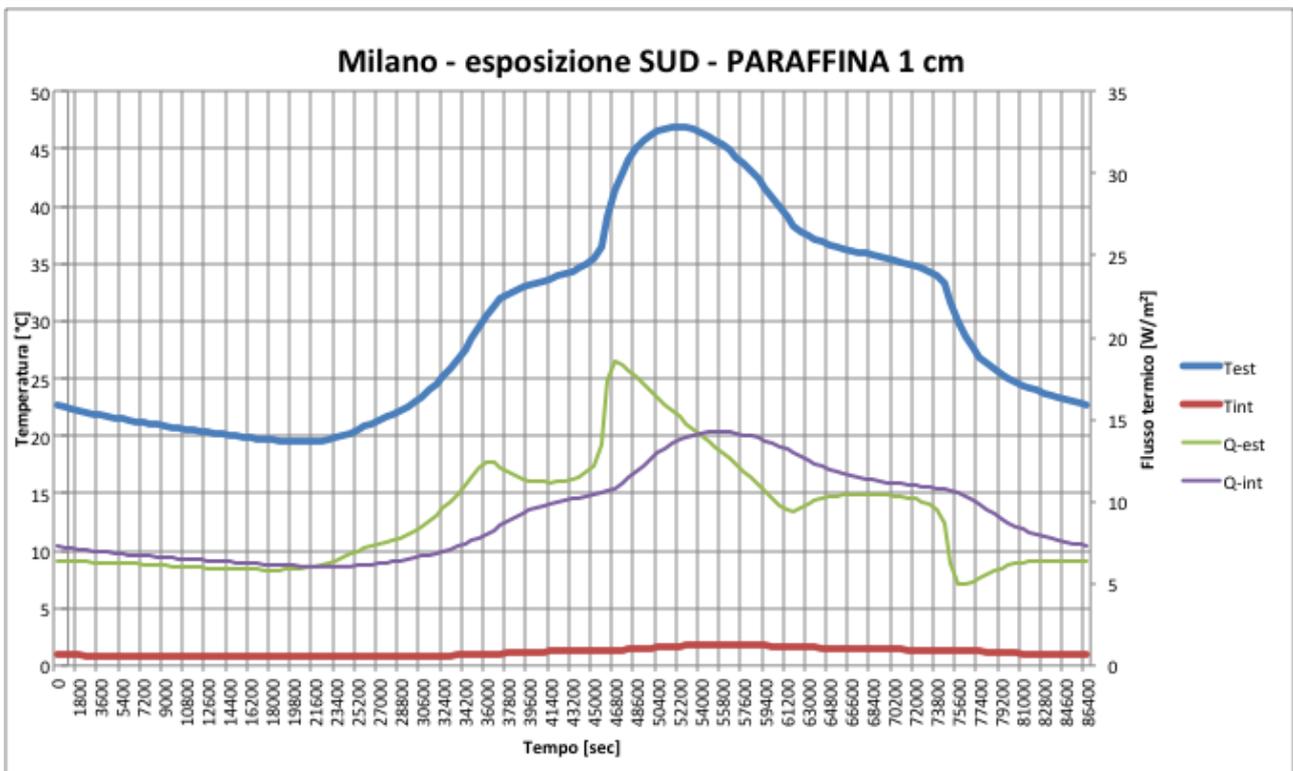
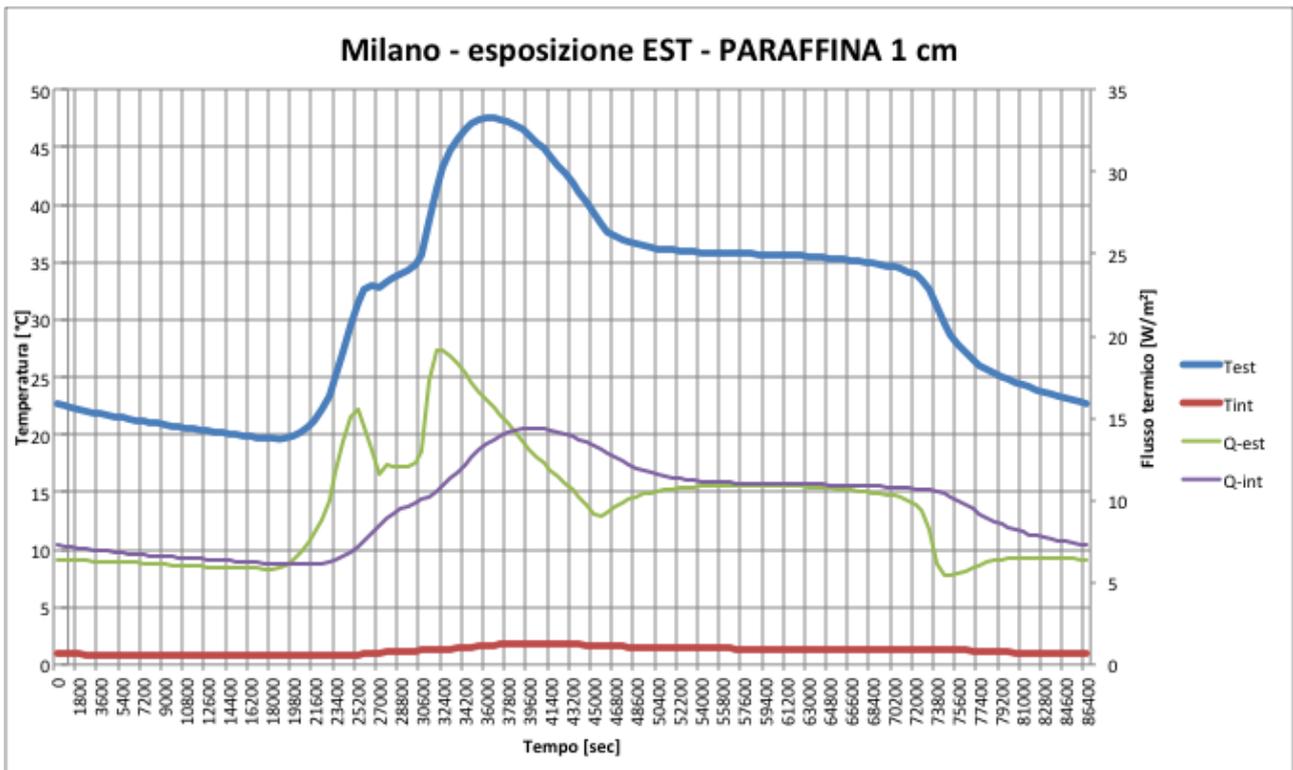


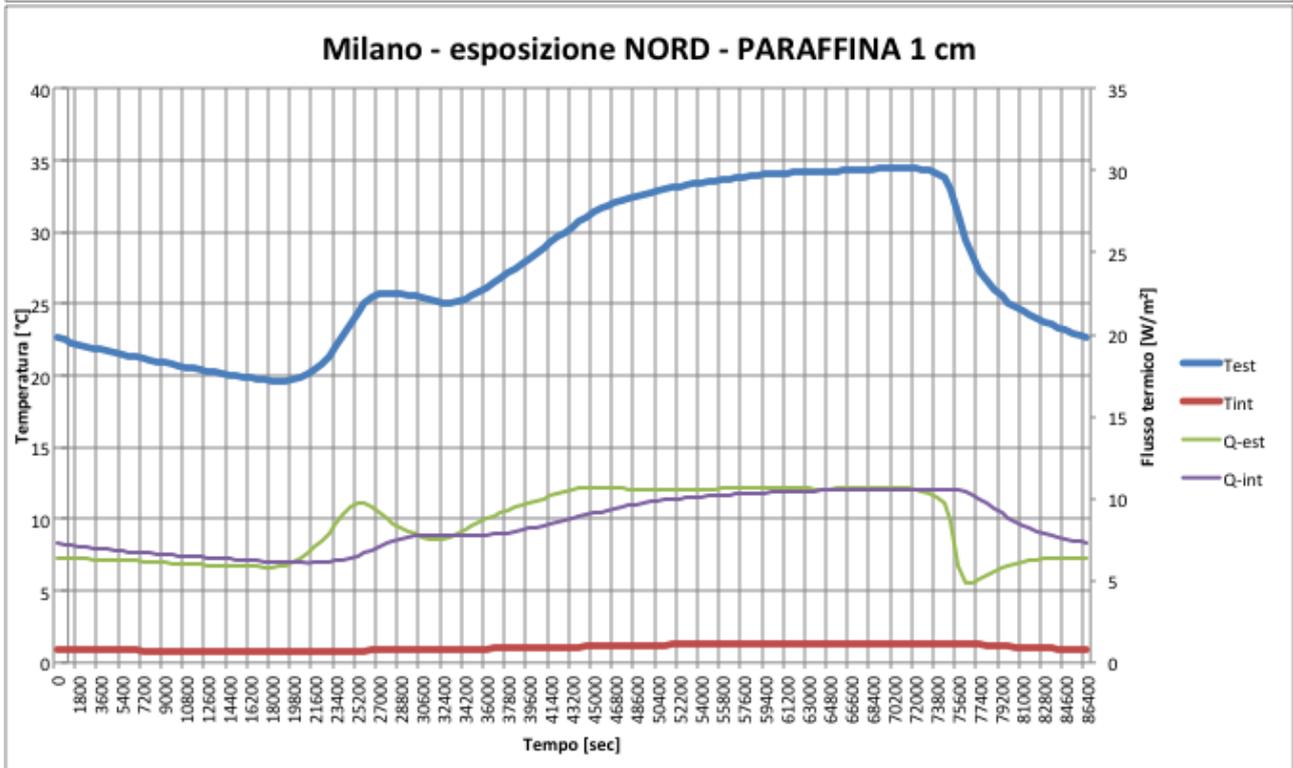
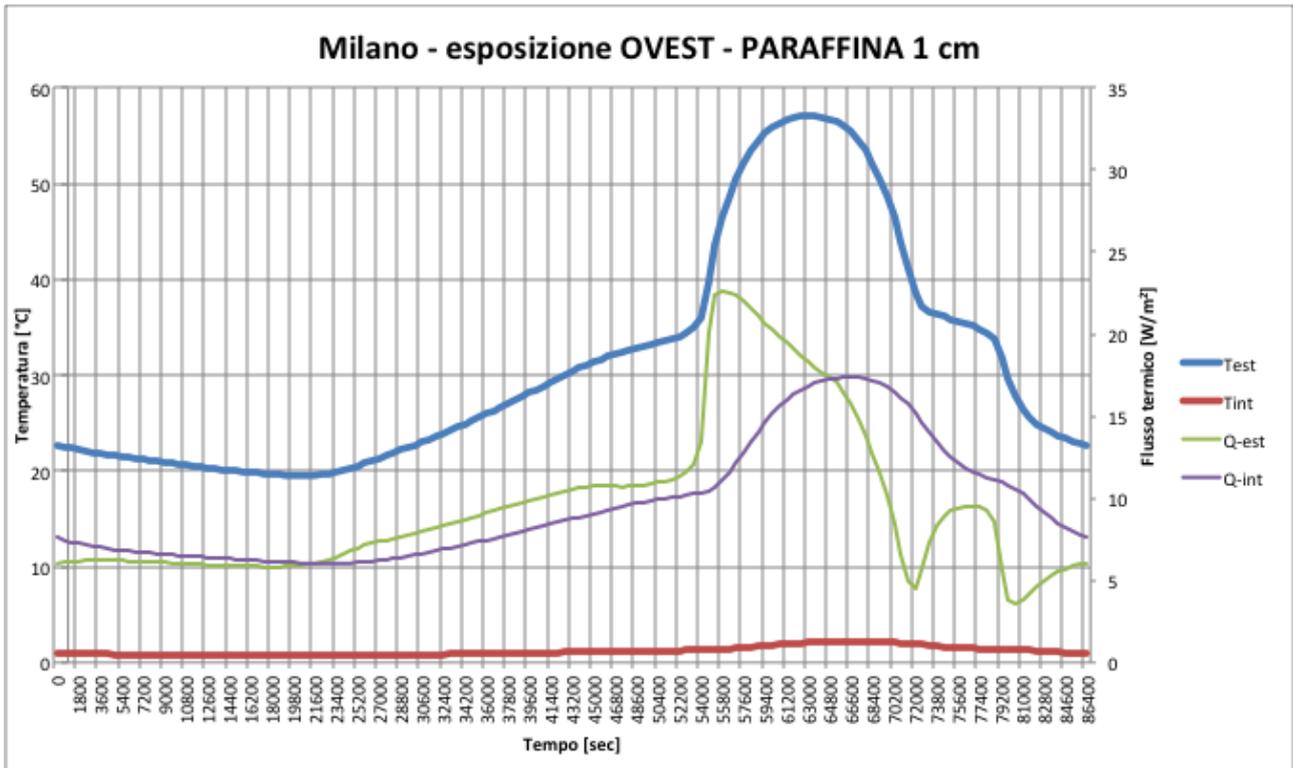




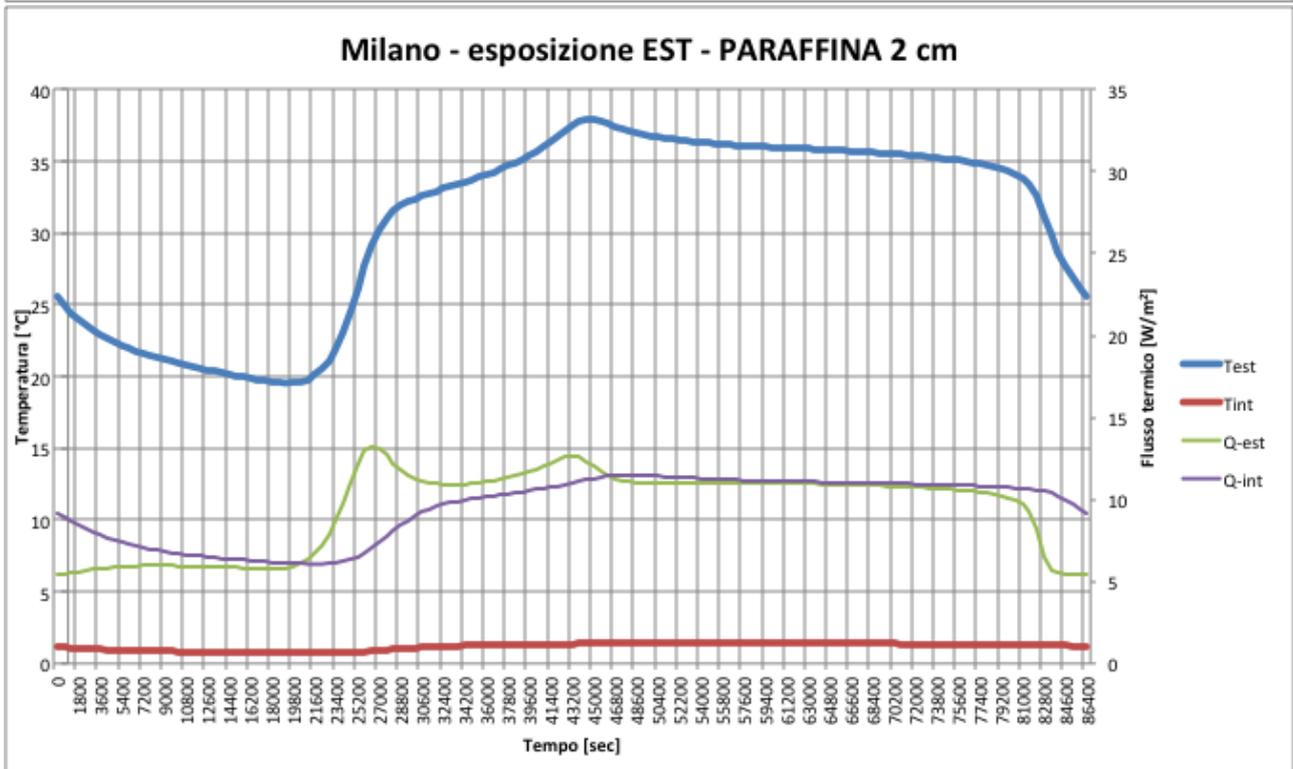
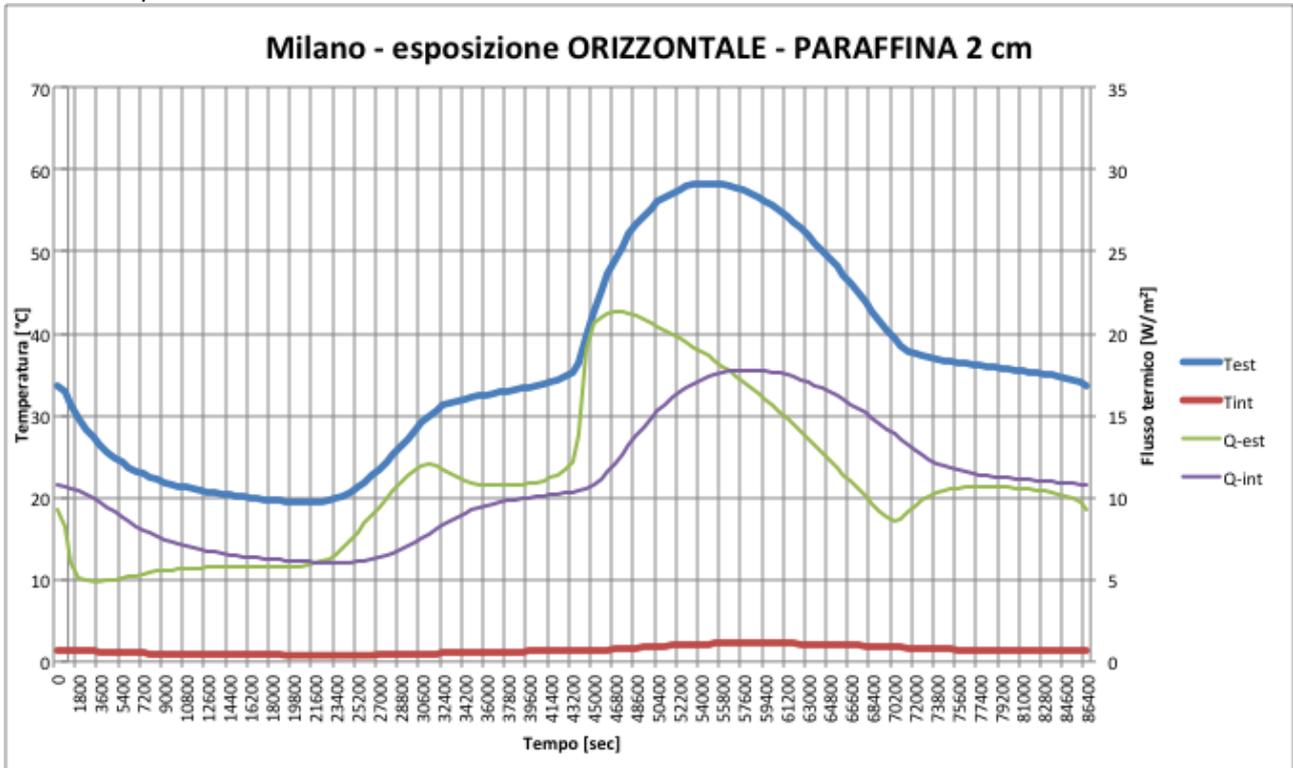
MODELLO: paraffina RT35 – 1 cm

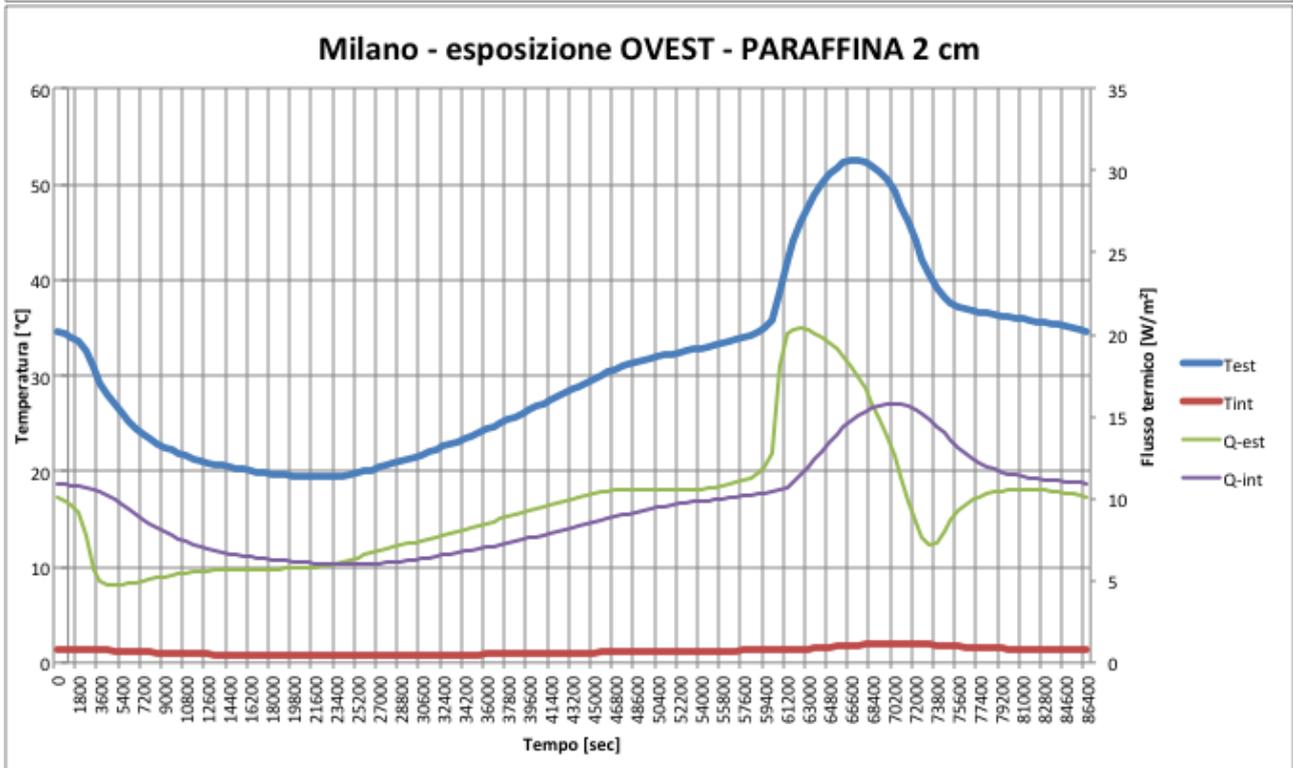
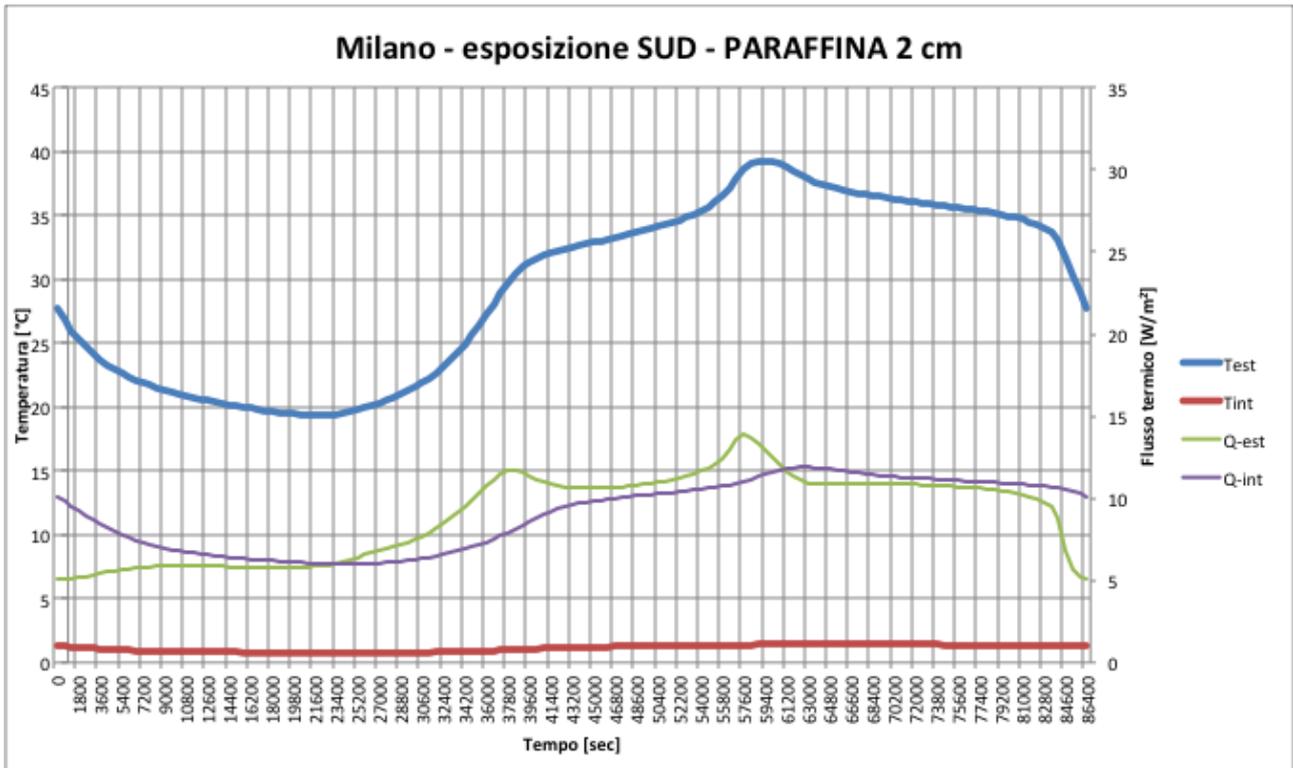


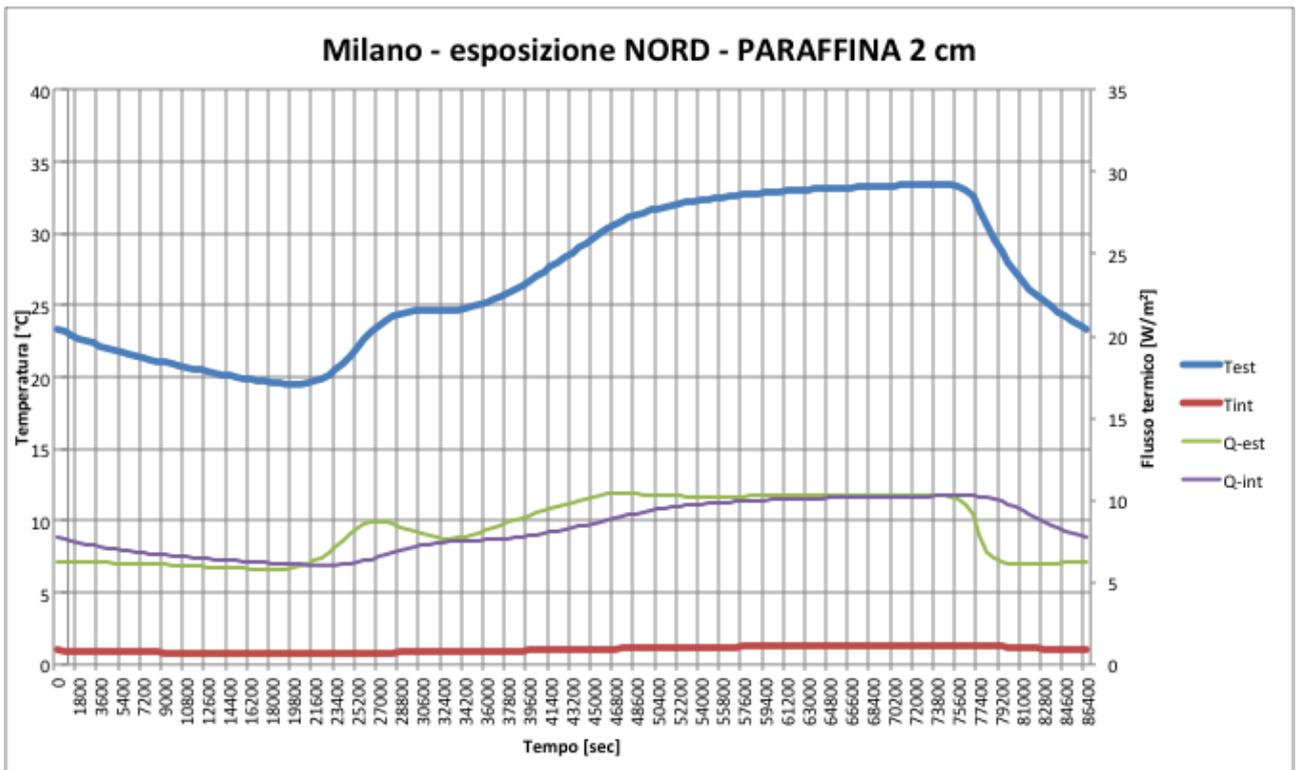




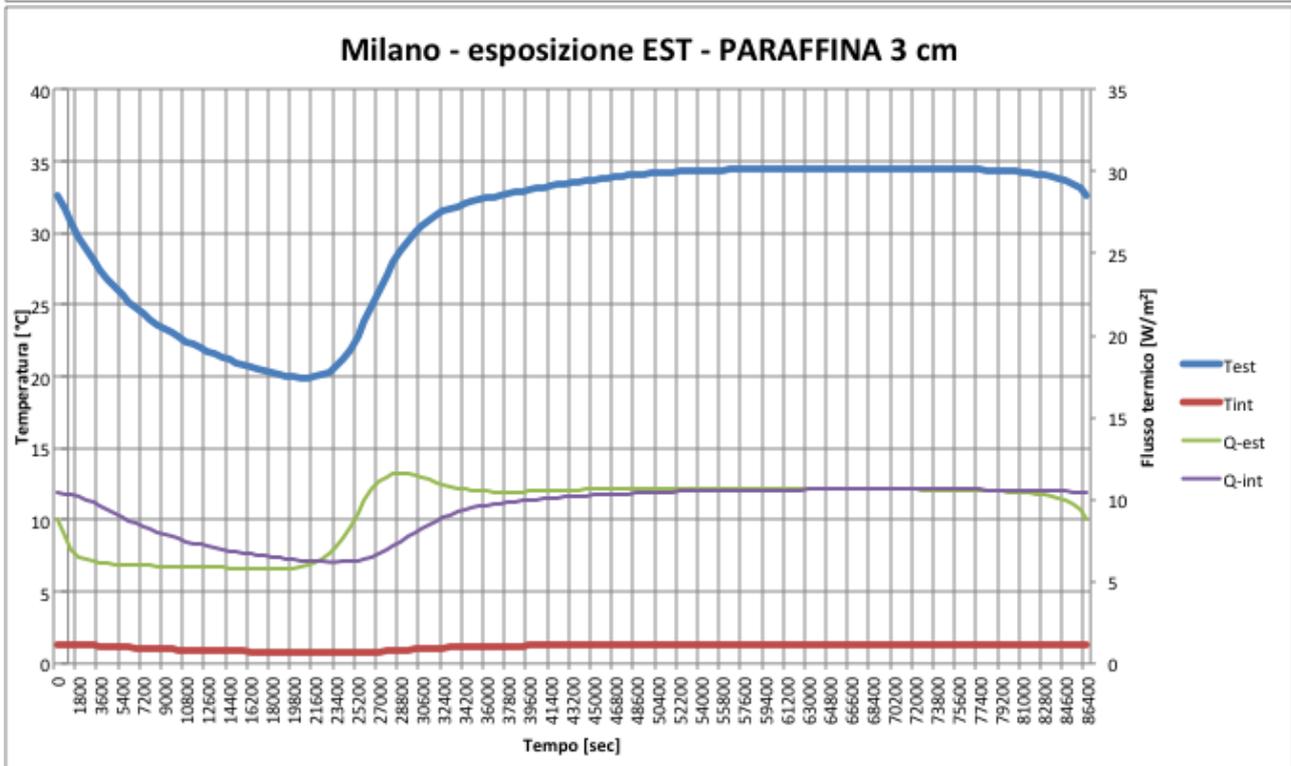
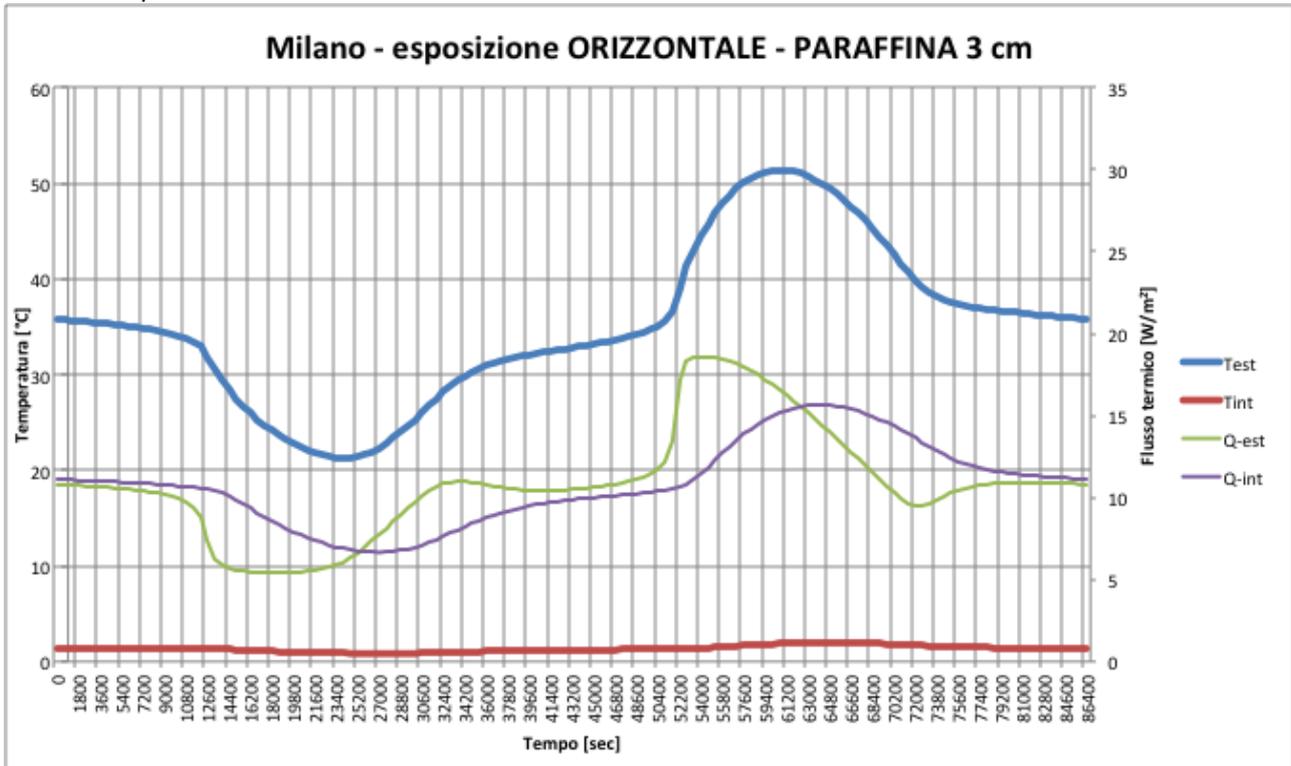
MODELLO: paraffina RT35 – 2 cm

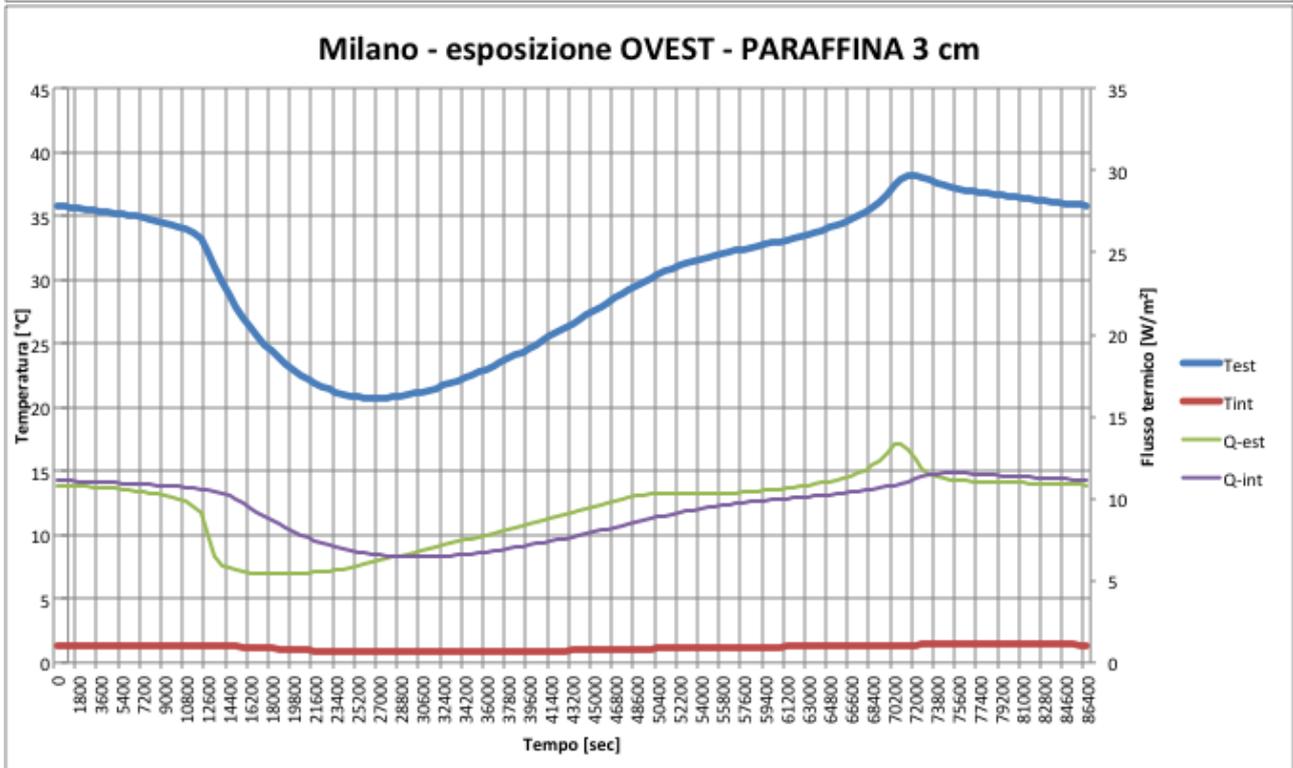
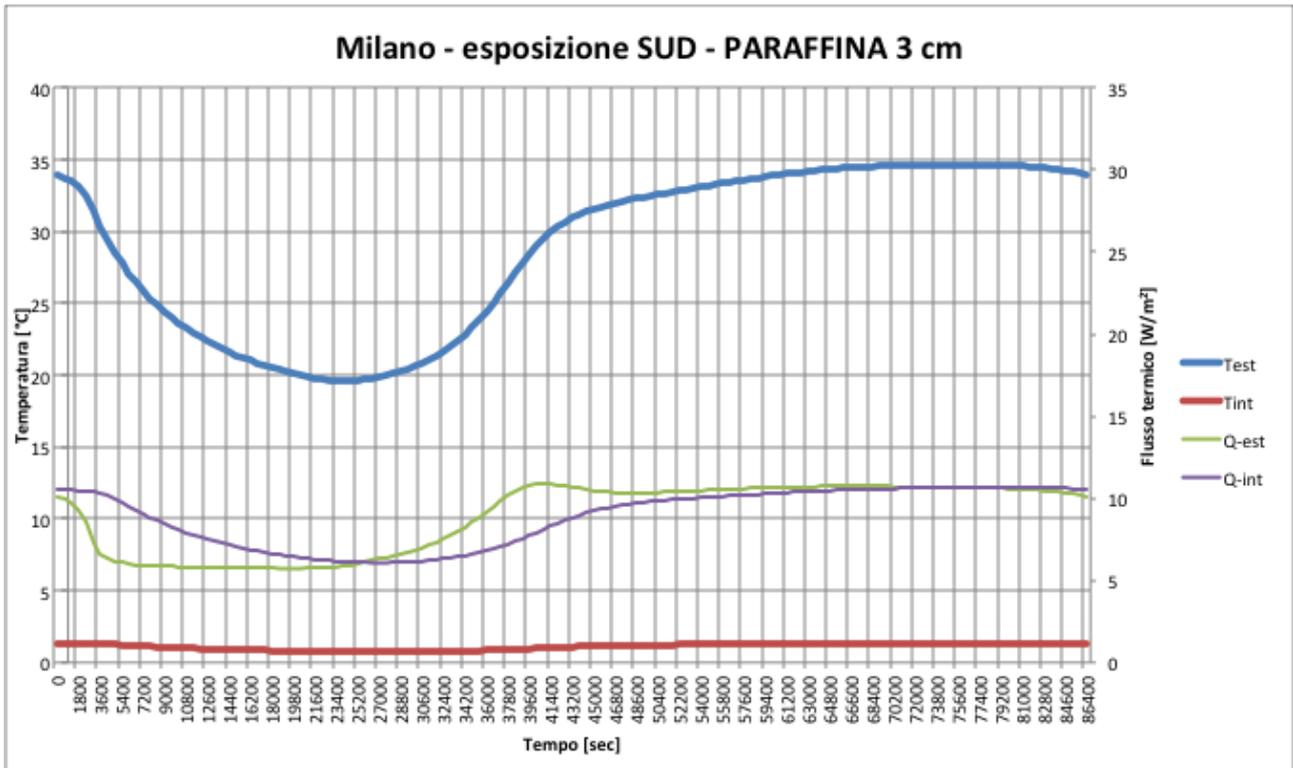


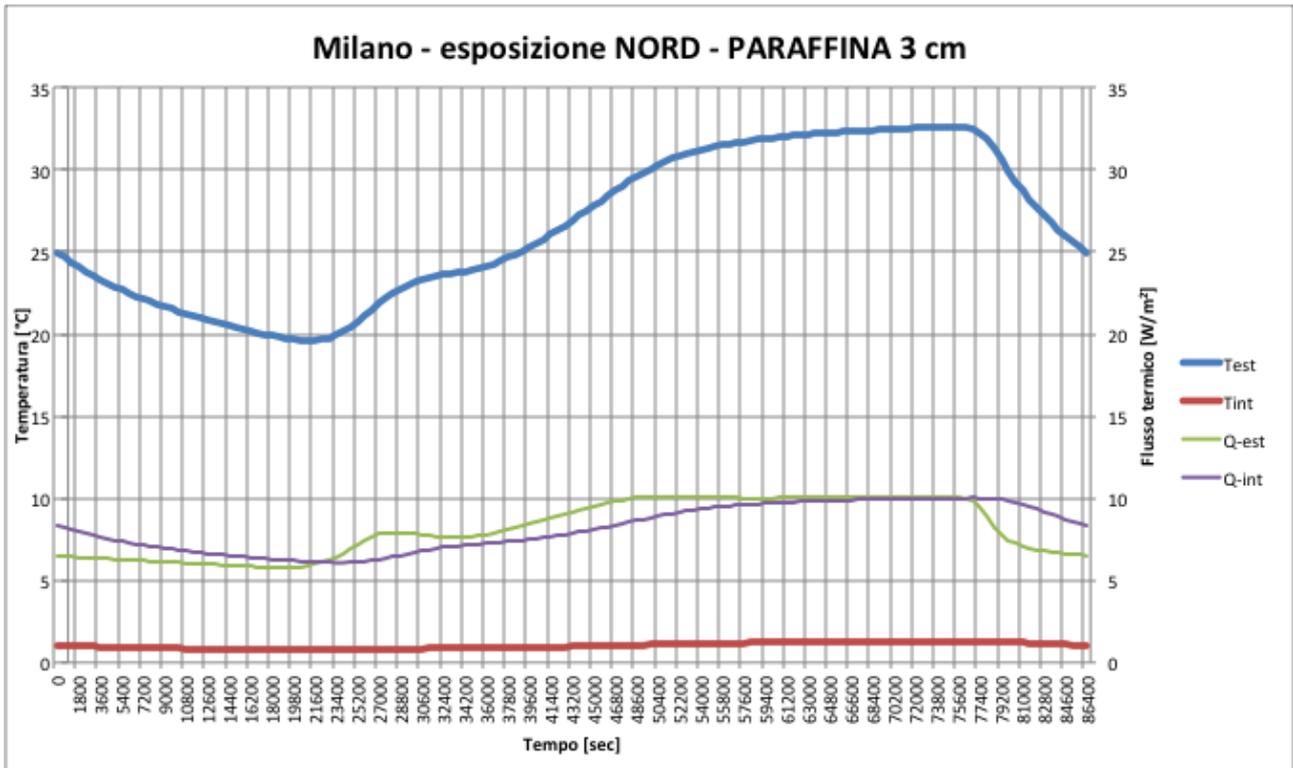




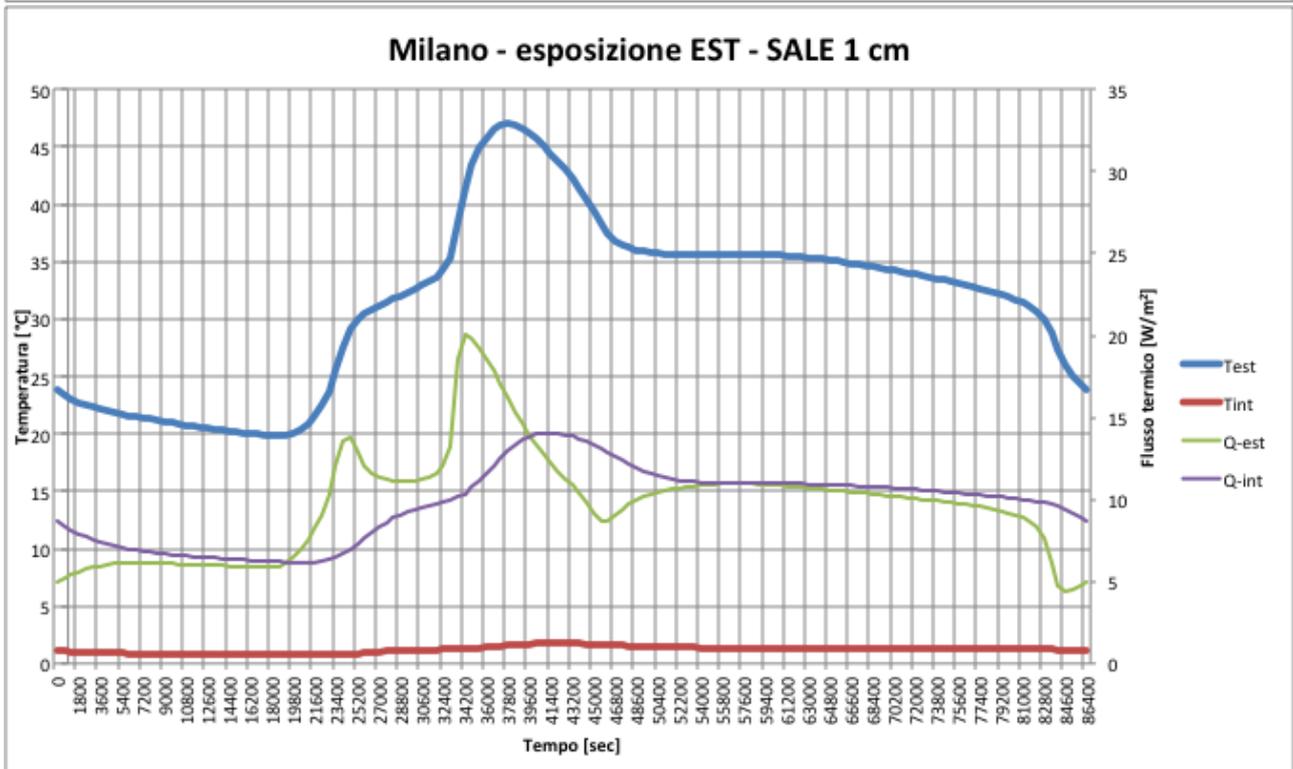
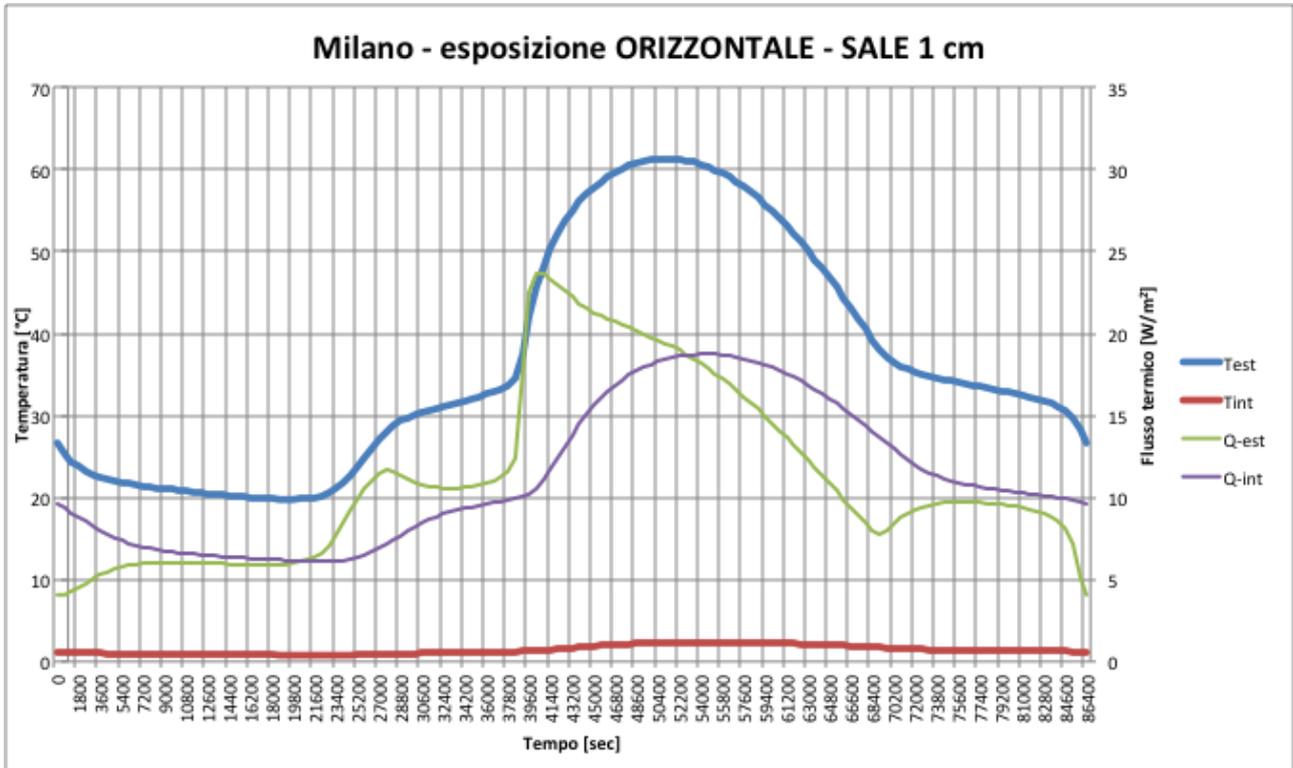
MODELLO: paraffina RT35 – 3 cm

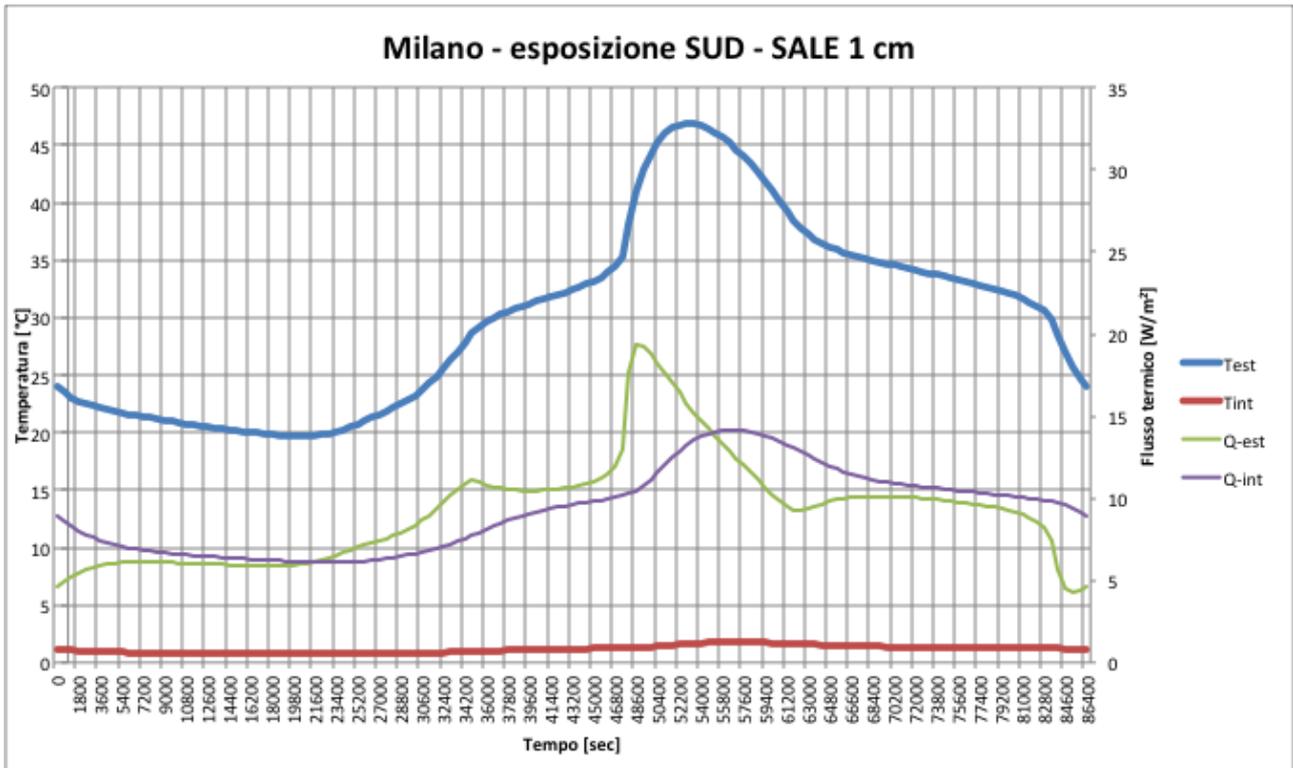


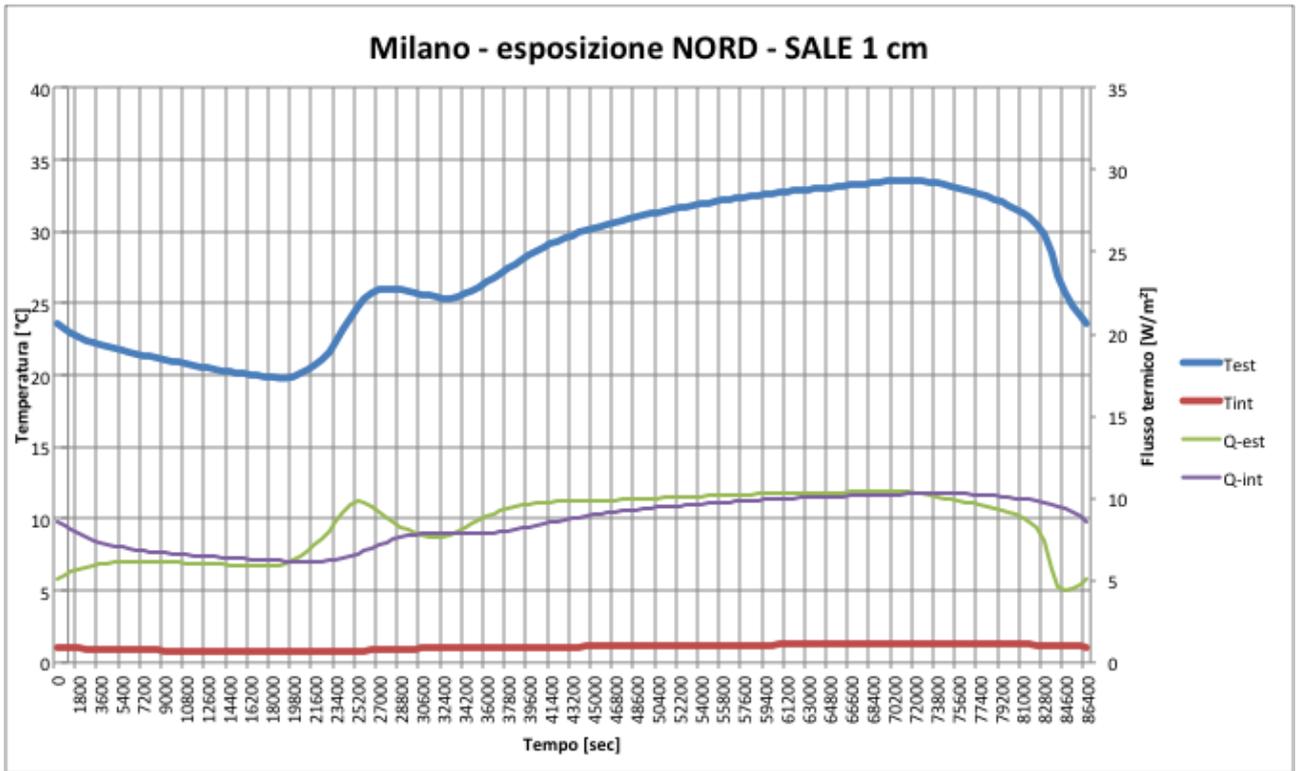




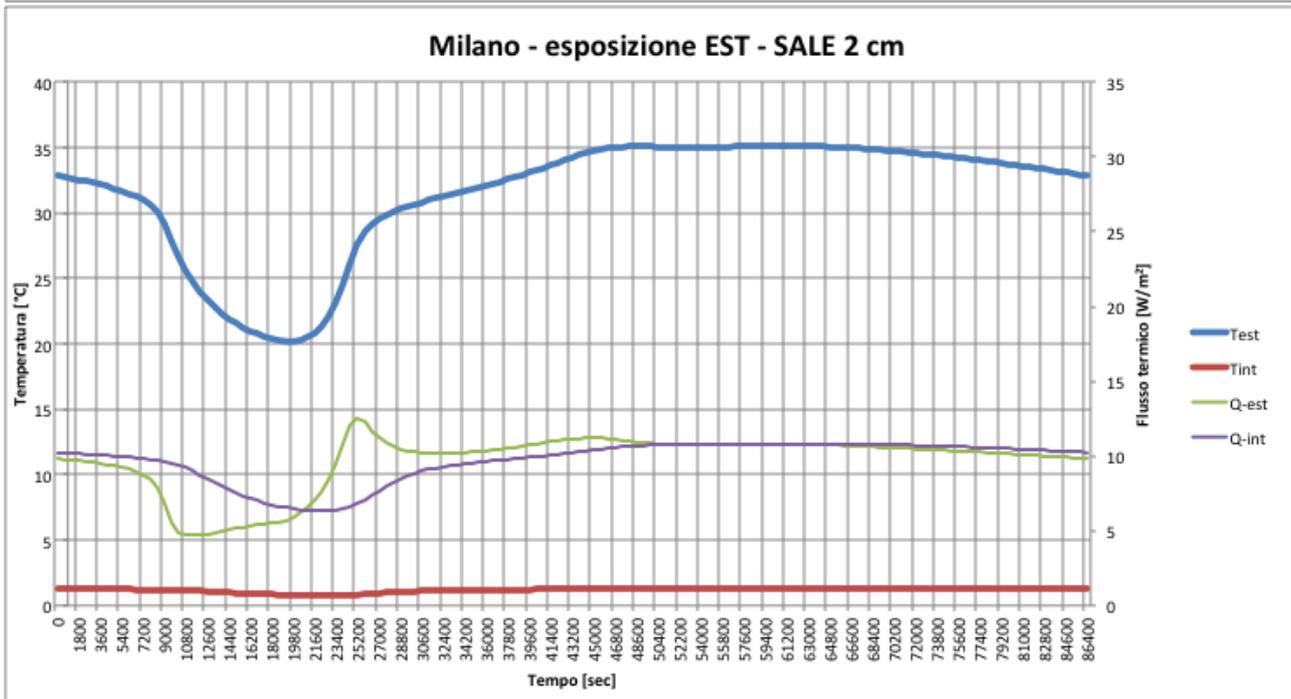
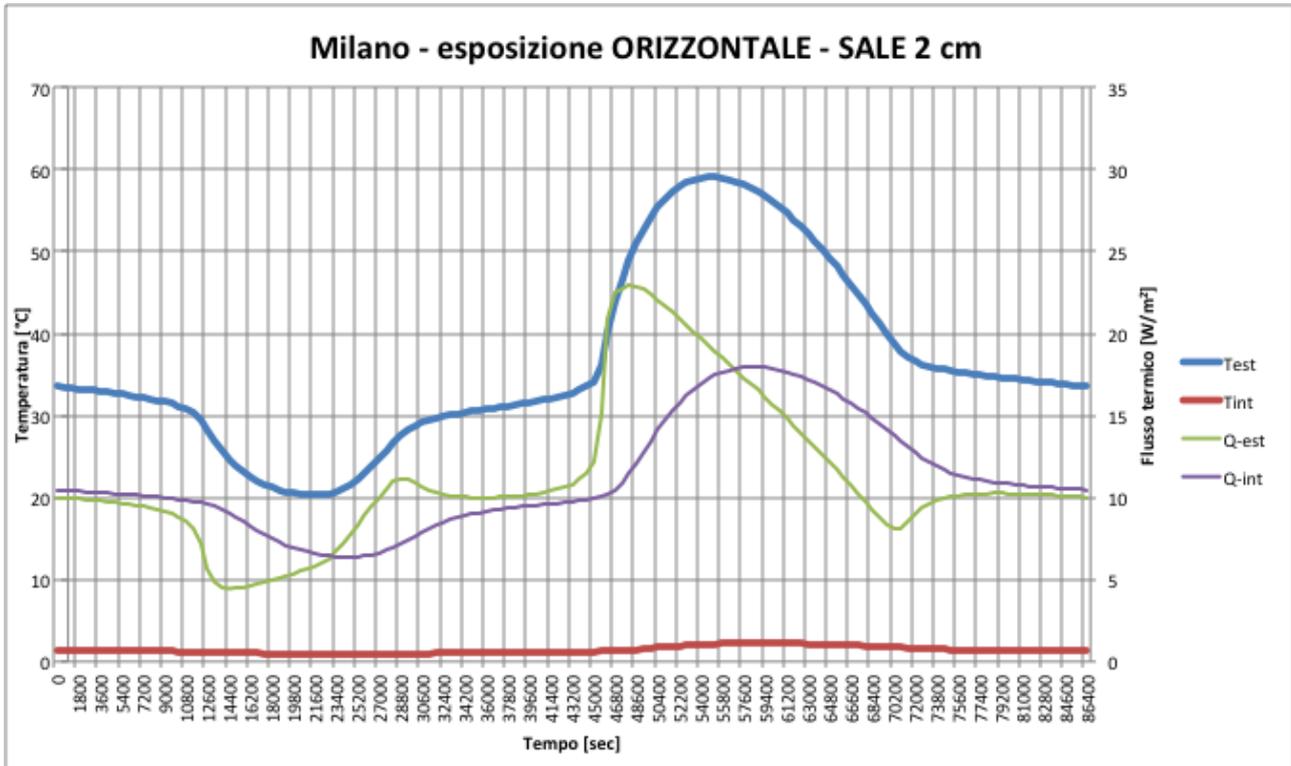
MODELLO: SALE C32 -1 cm

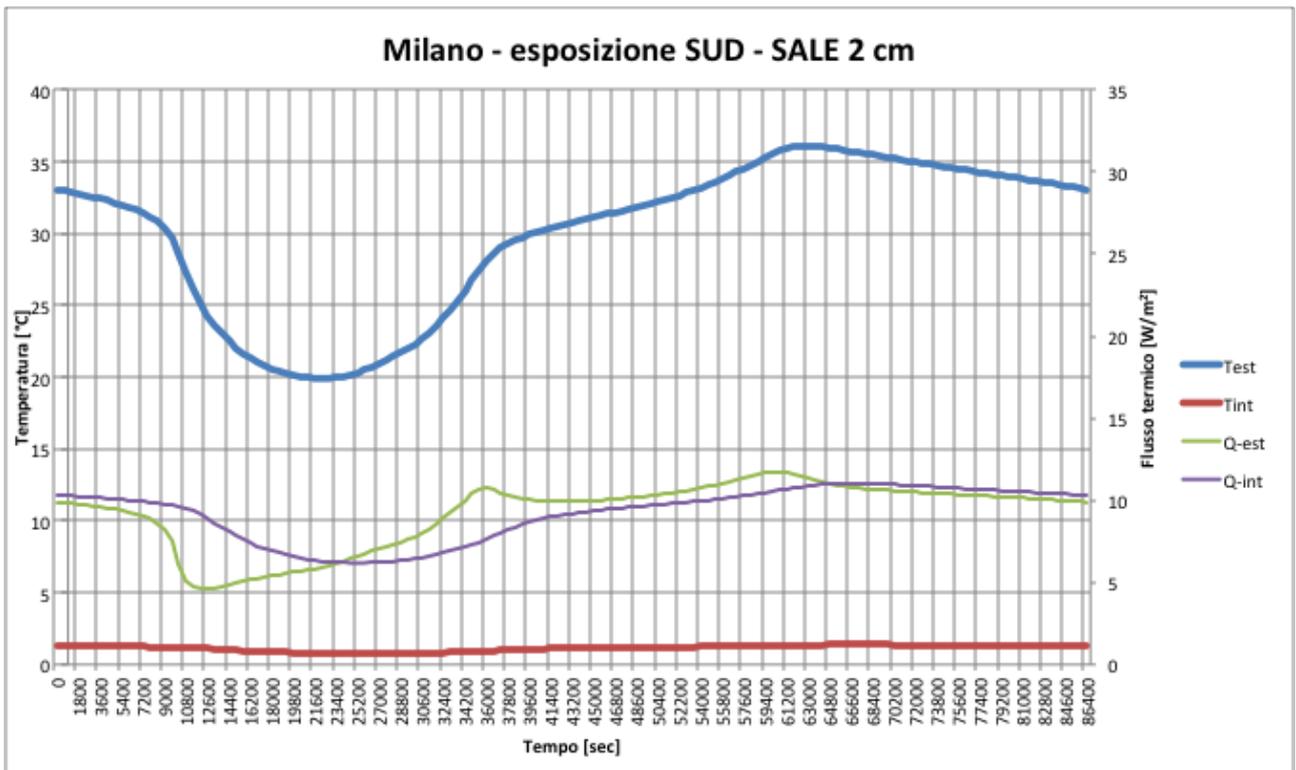


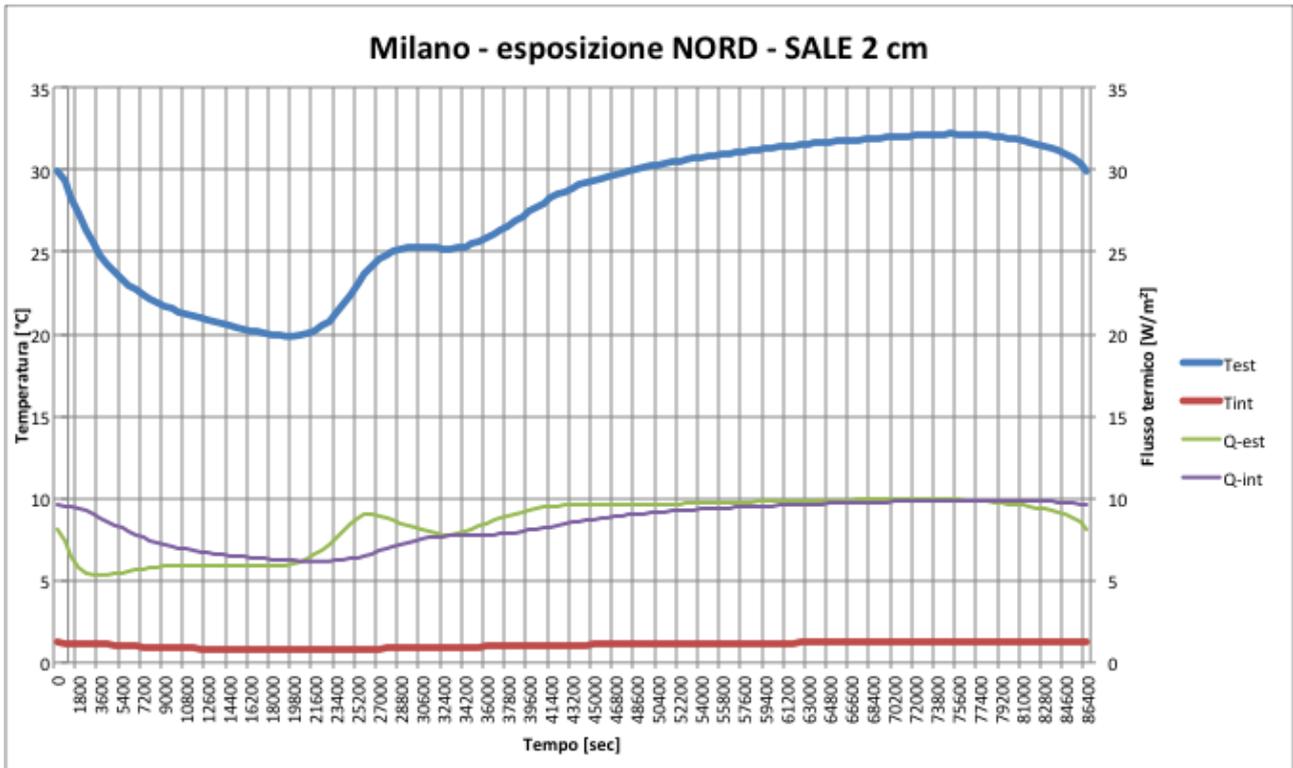




MODELLO: sale C32 – 2 cm

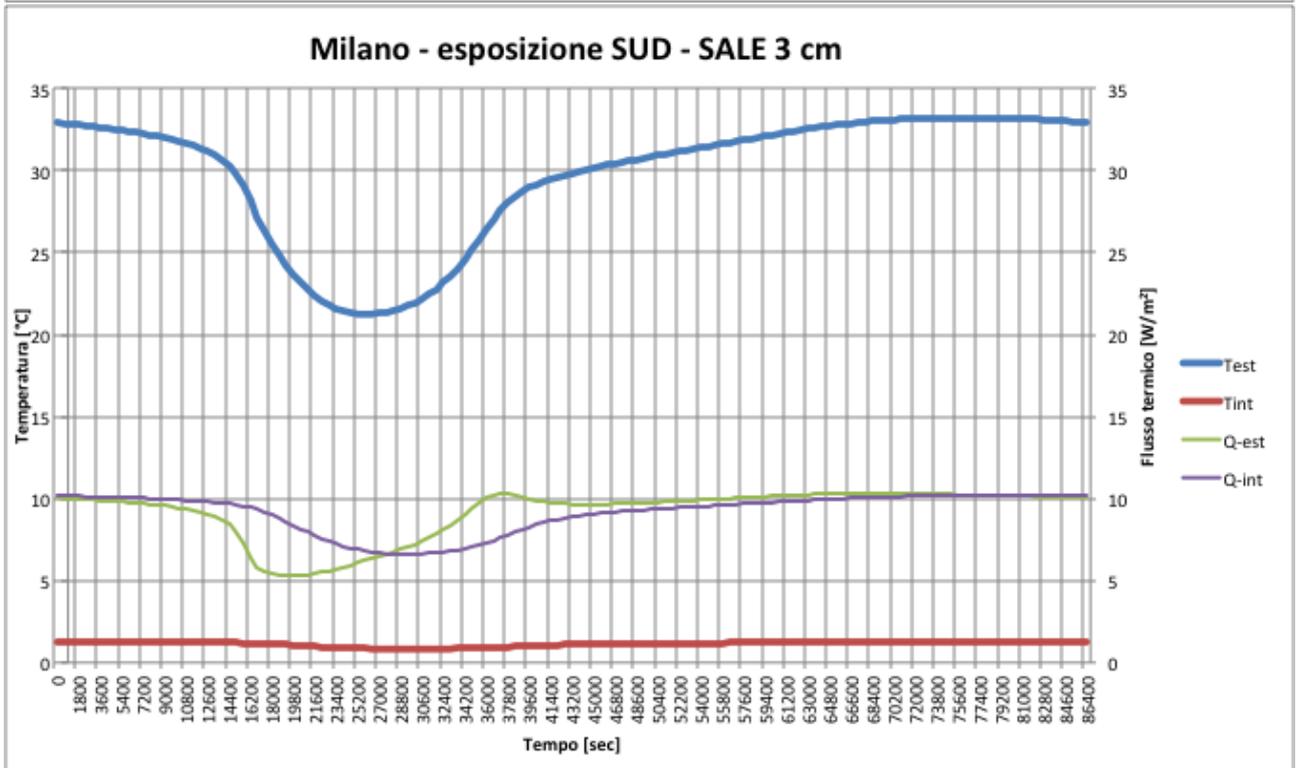
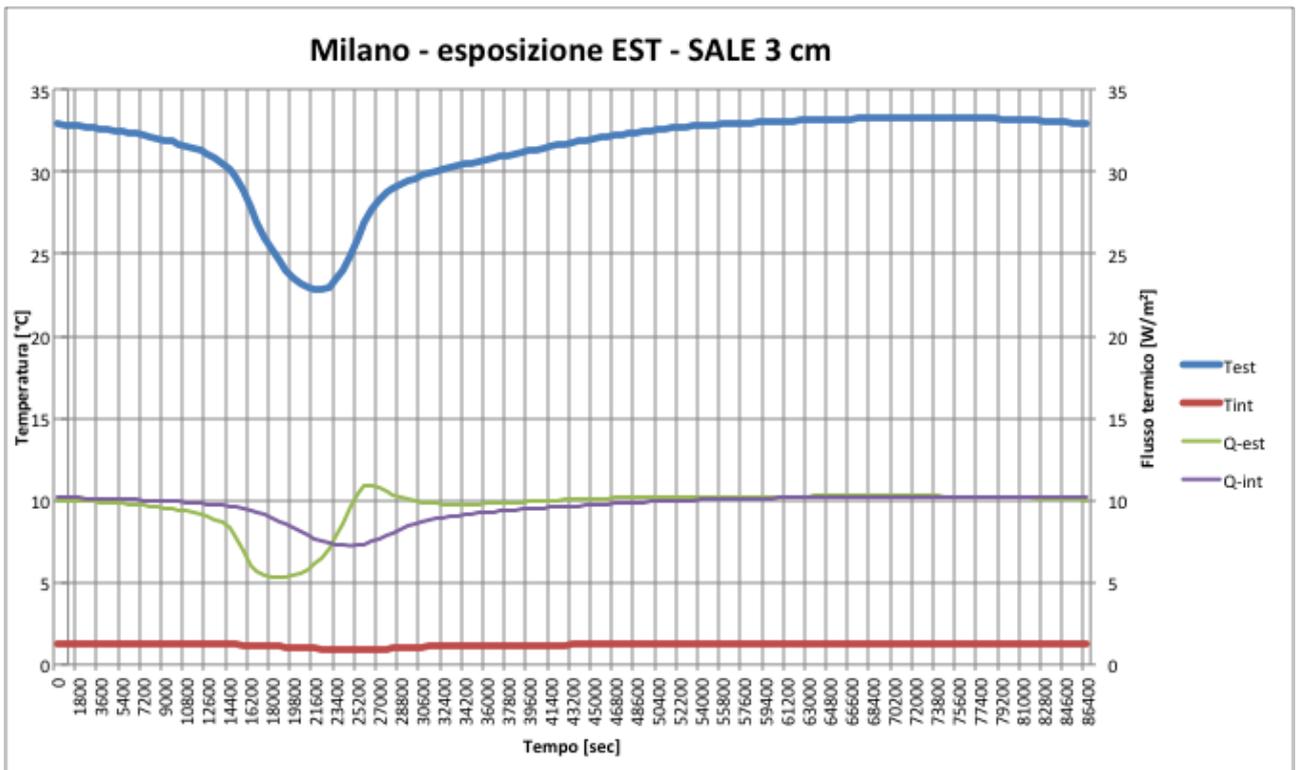


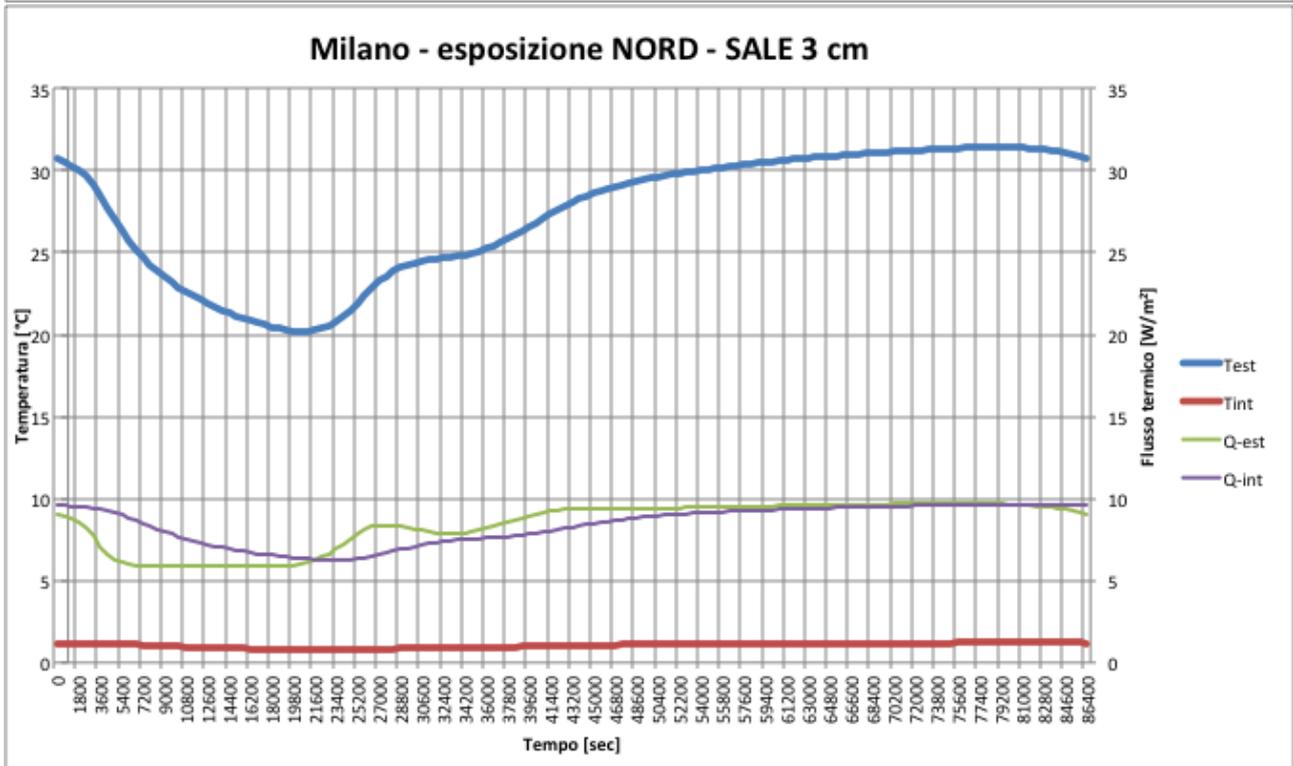
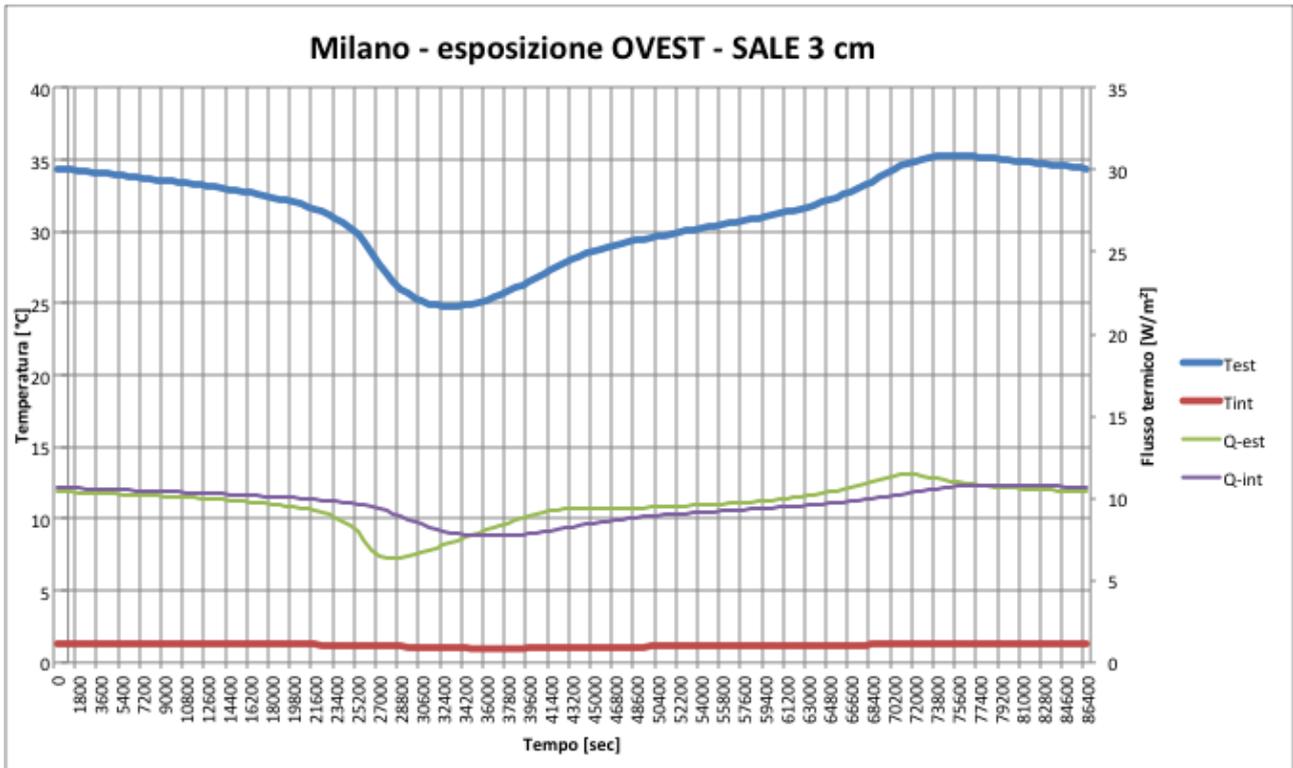




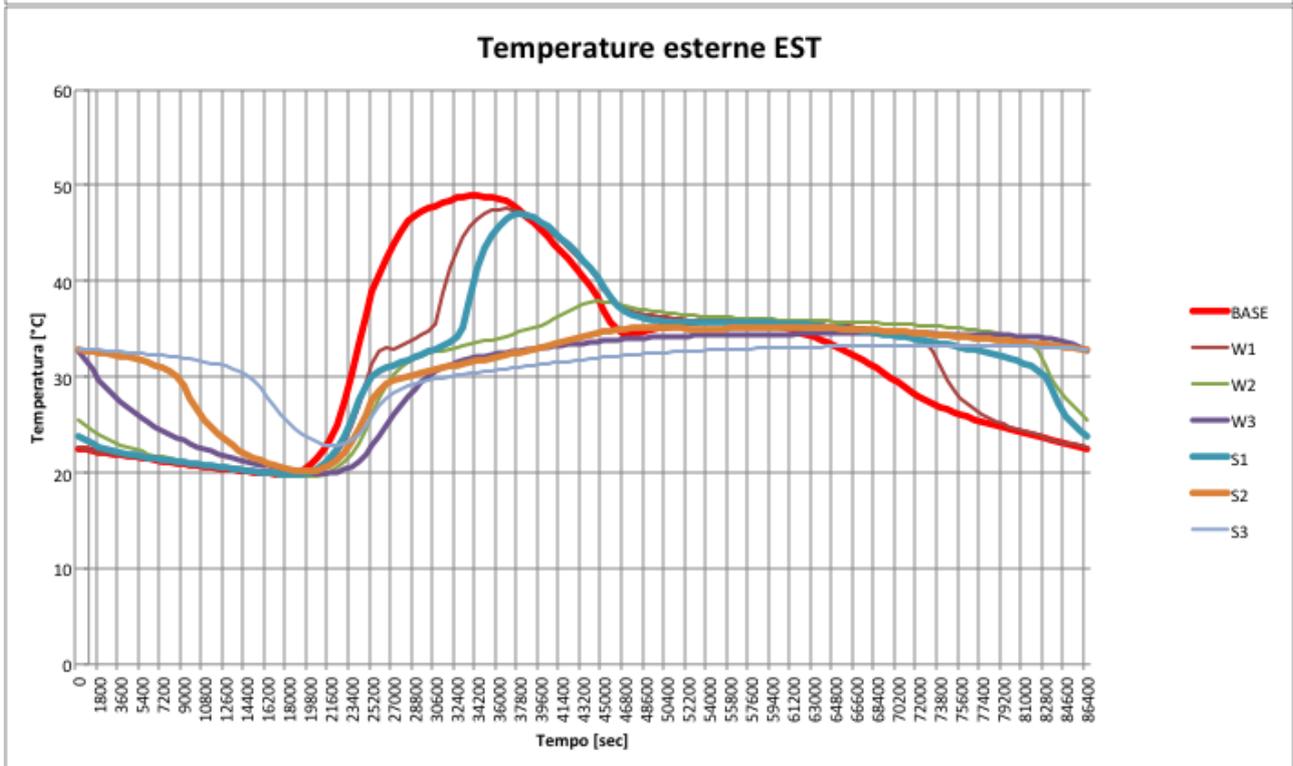
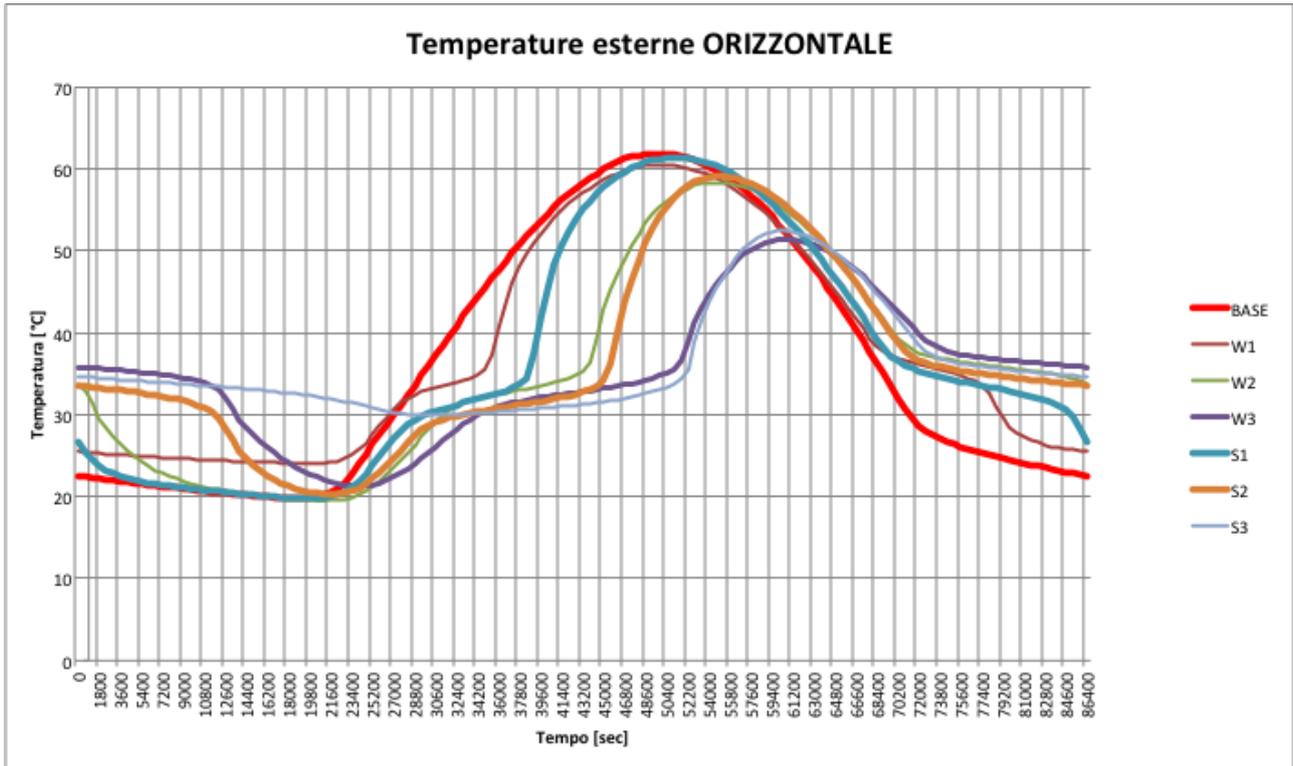
MODELLO: sale C32 – 3cm



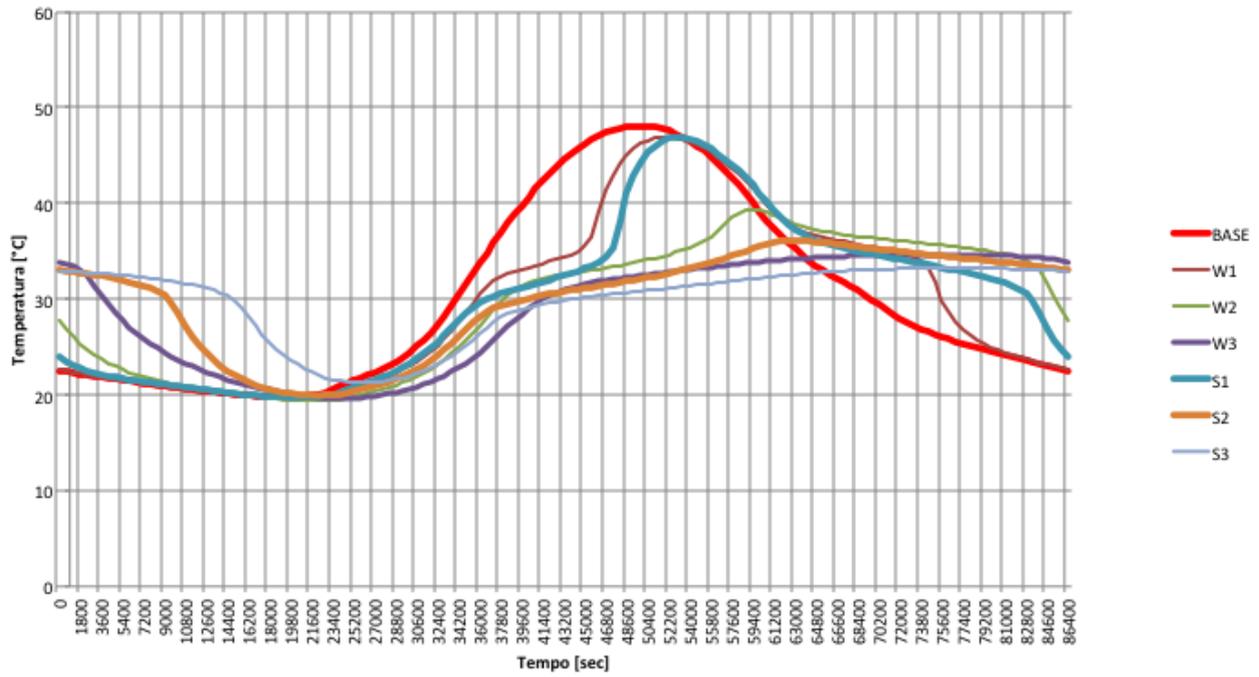




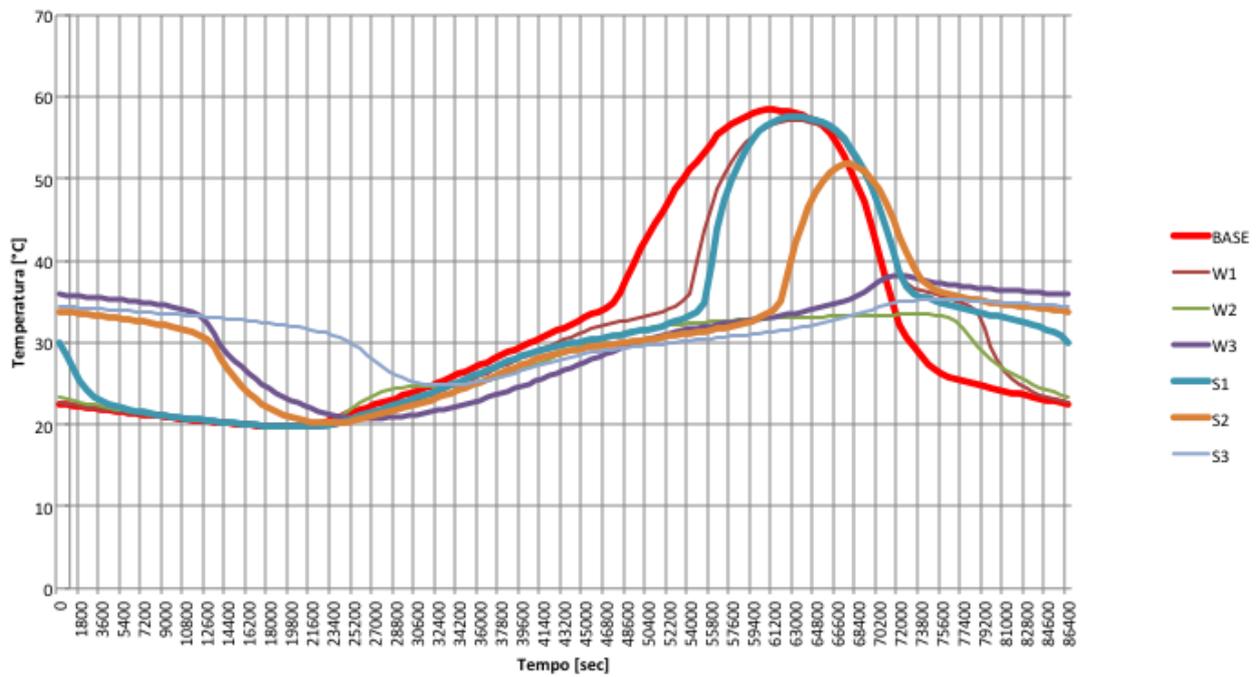
CONFRONTI: TEMPERATURA SUPERFICIE ESTERNA SANDWICH

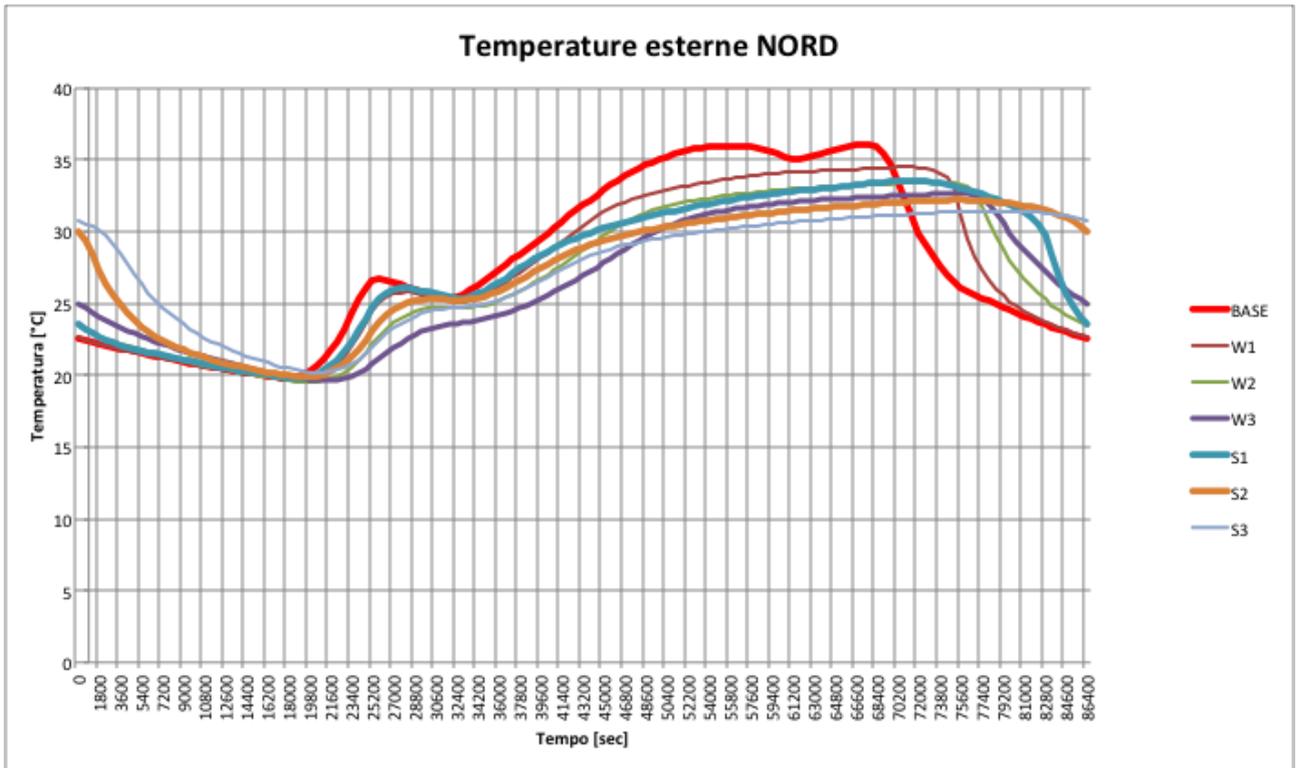


### Temperature esterne SUD

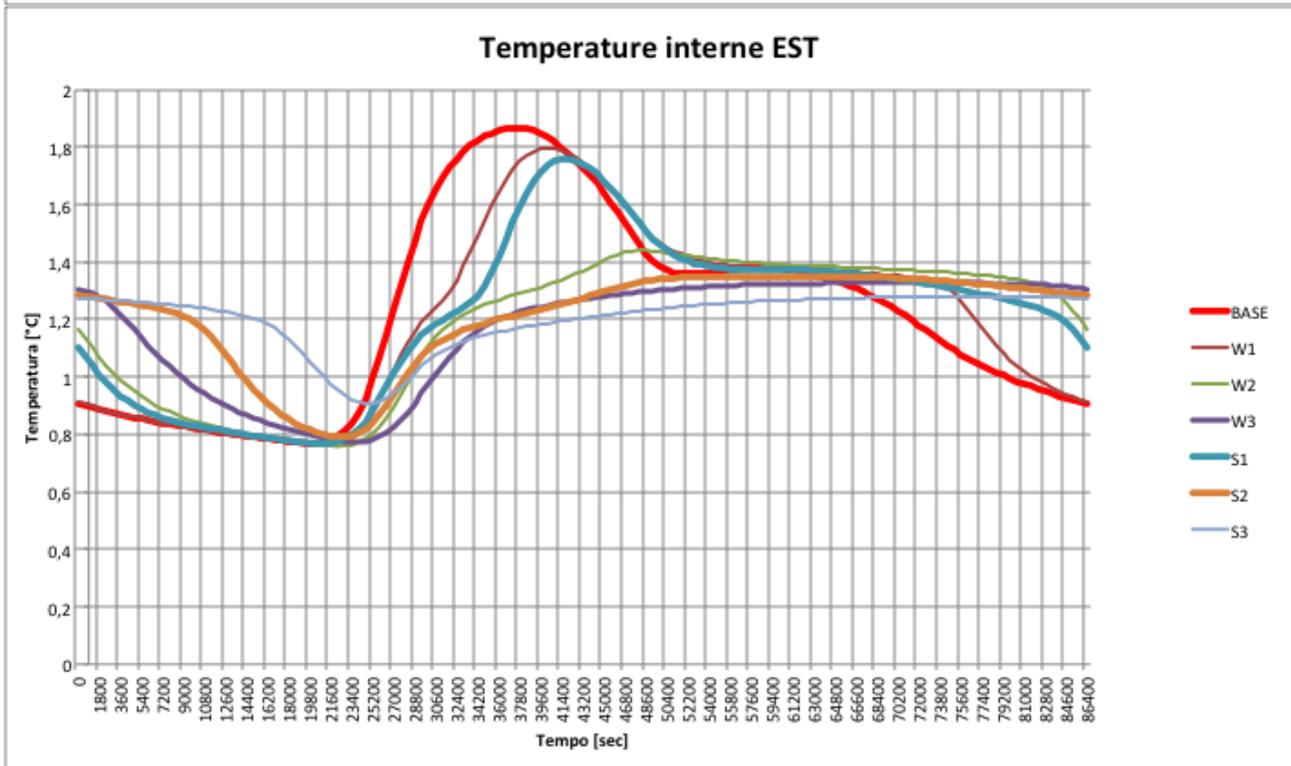
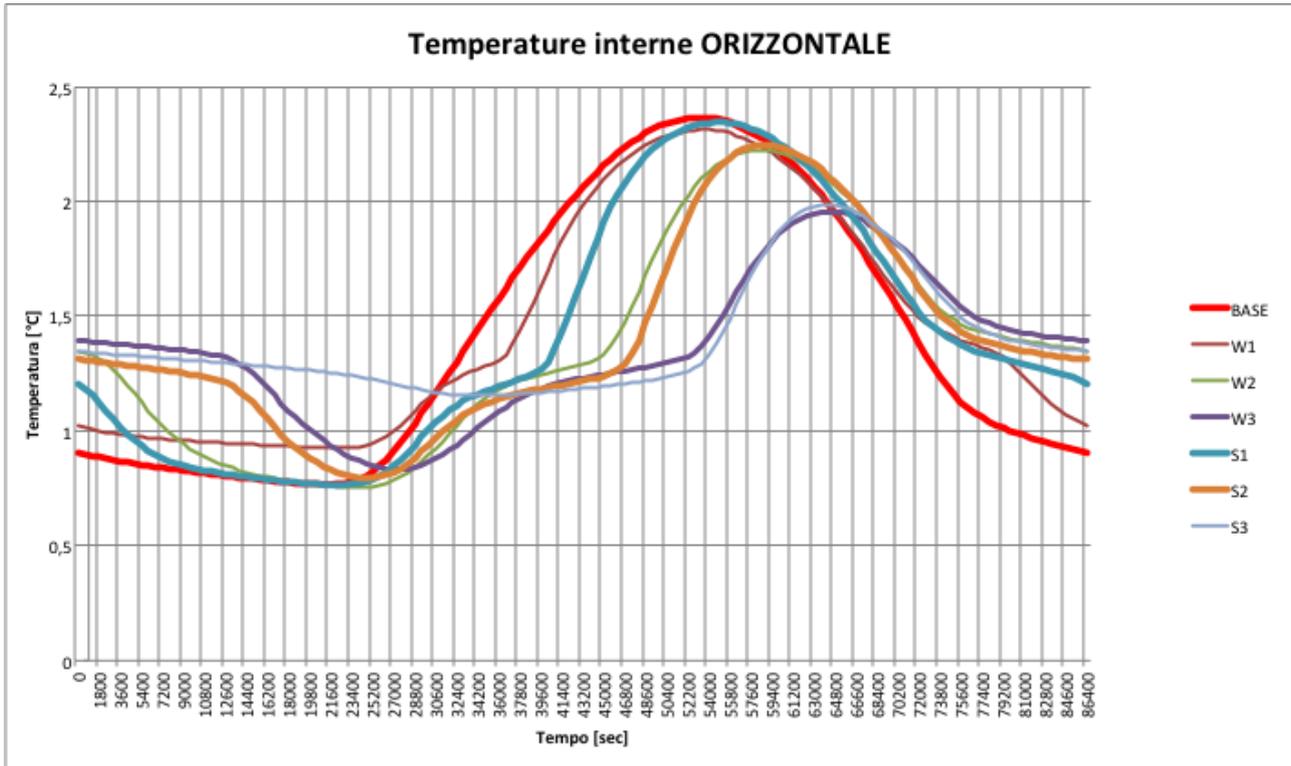


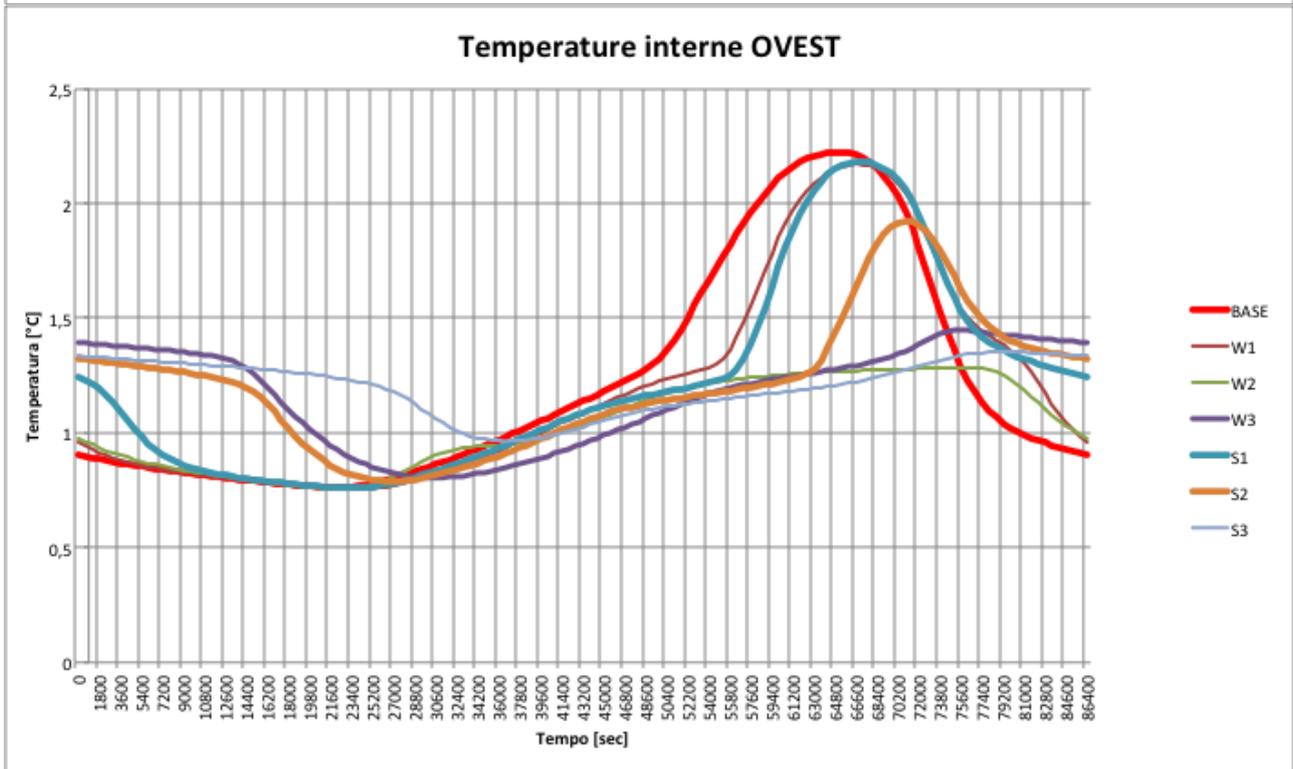
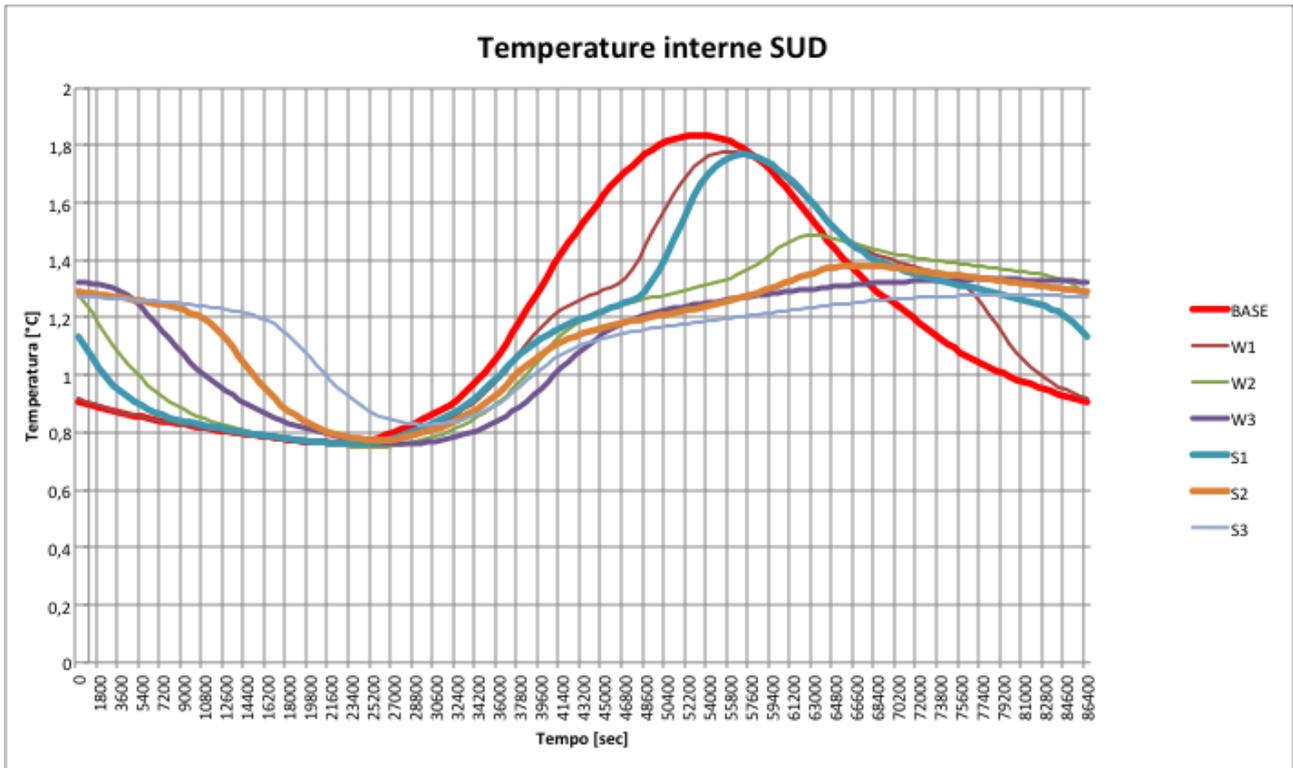
### Temperature esterne OVEST

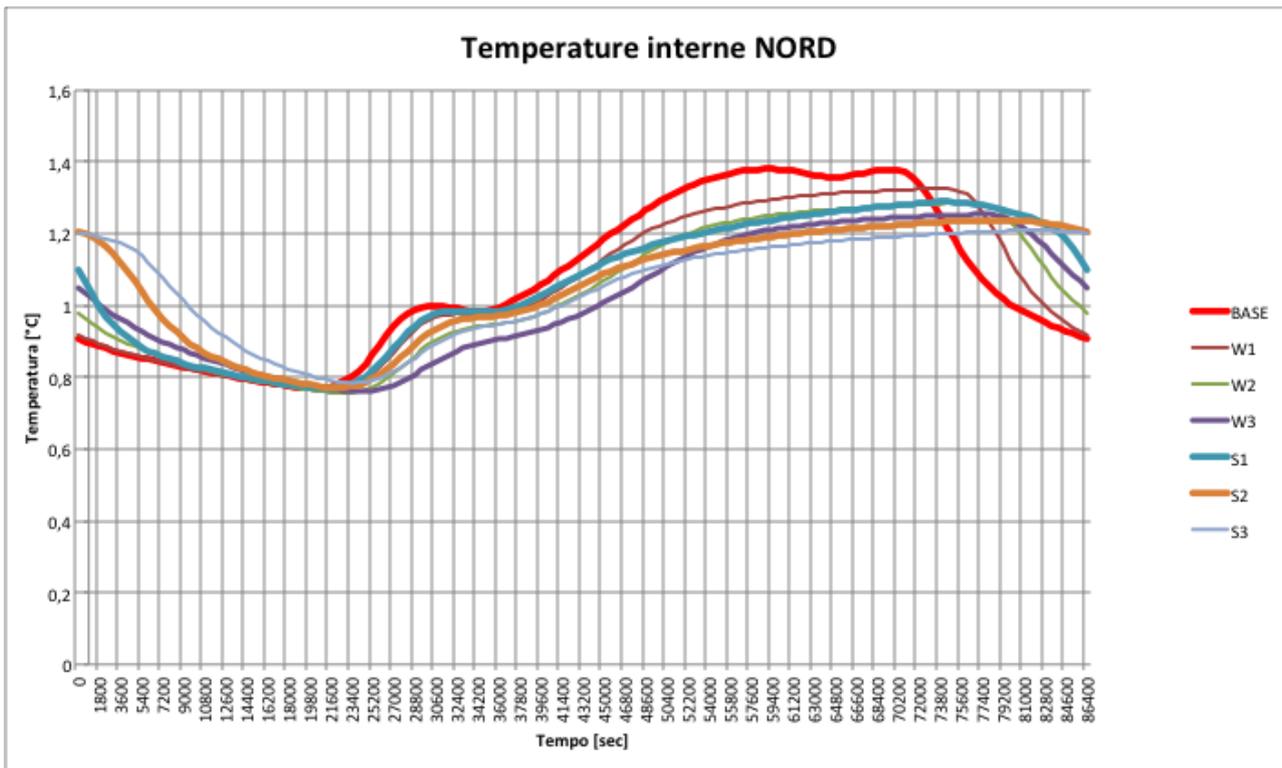




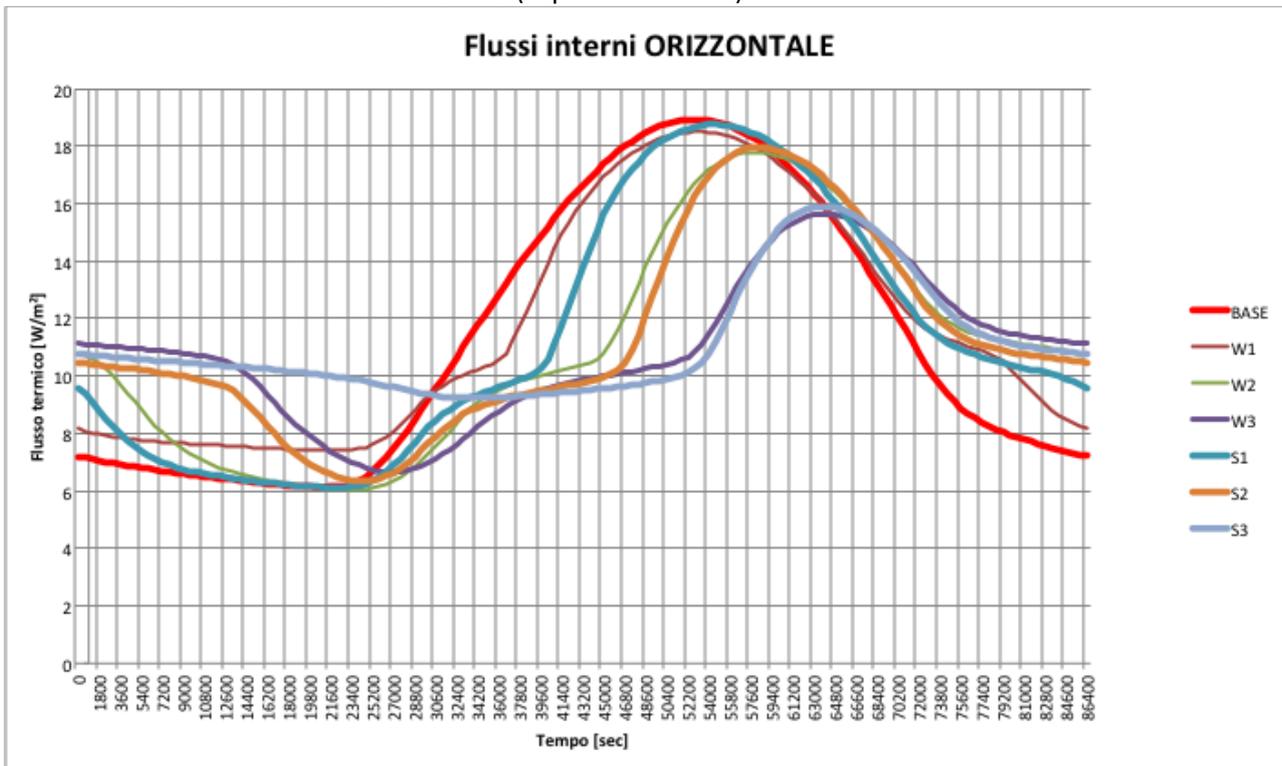
CONFRONTI: TEMPERATURA SUPERFICIE INTERNA

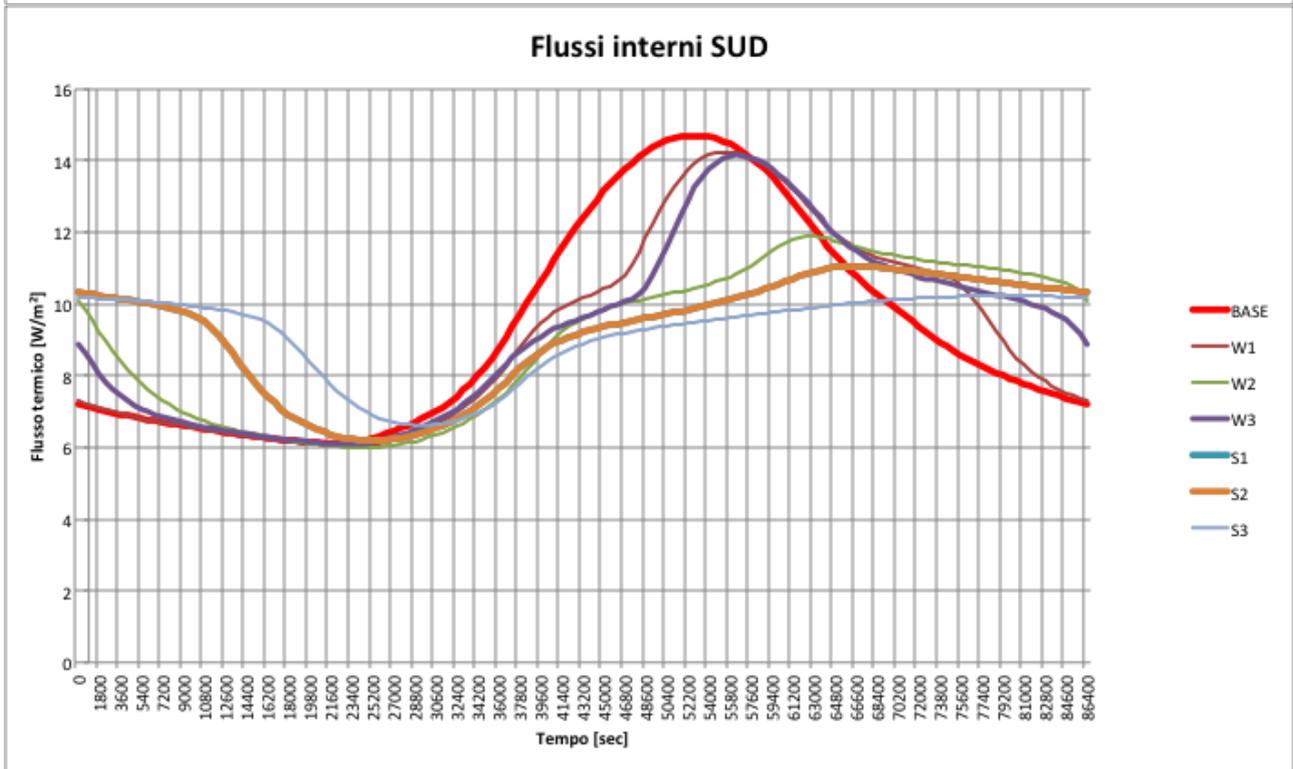
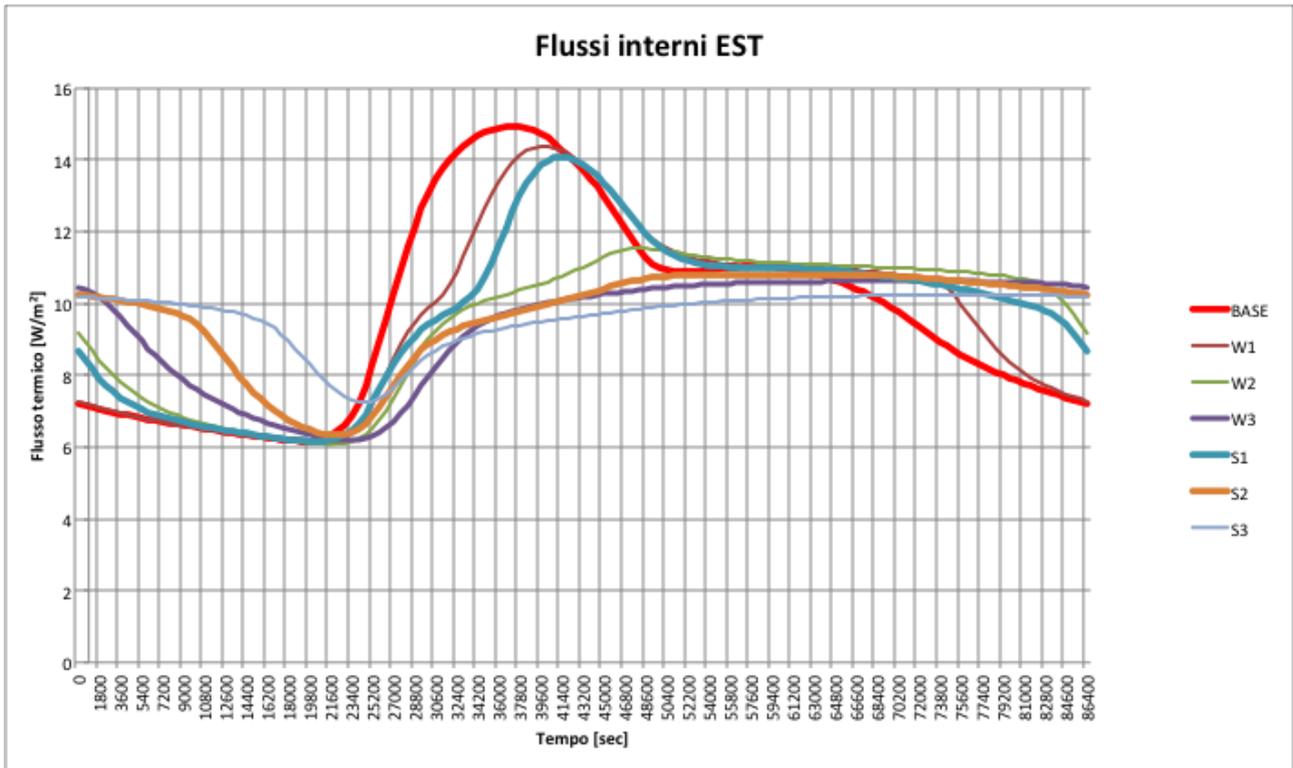




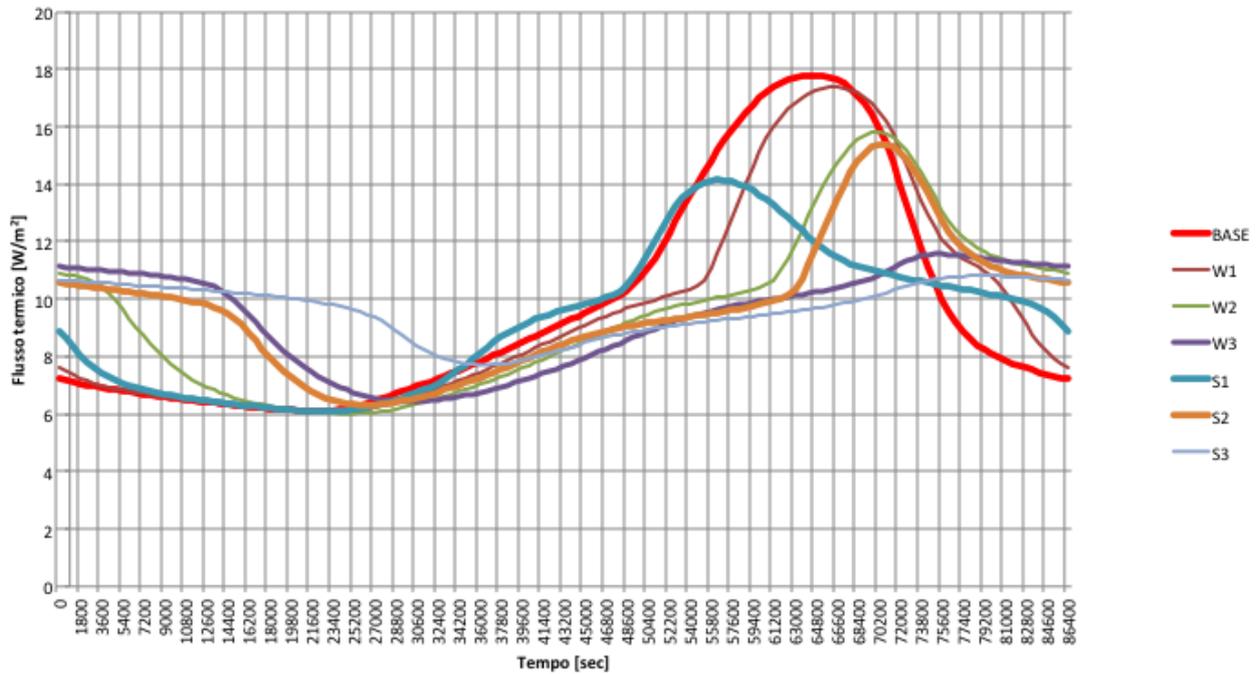


CONFRONTI: FLUSSO TERMICO ENTRANTE (superficie interna)

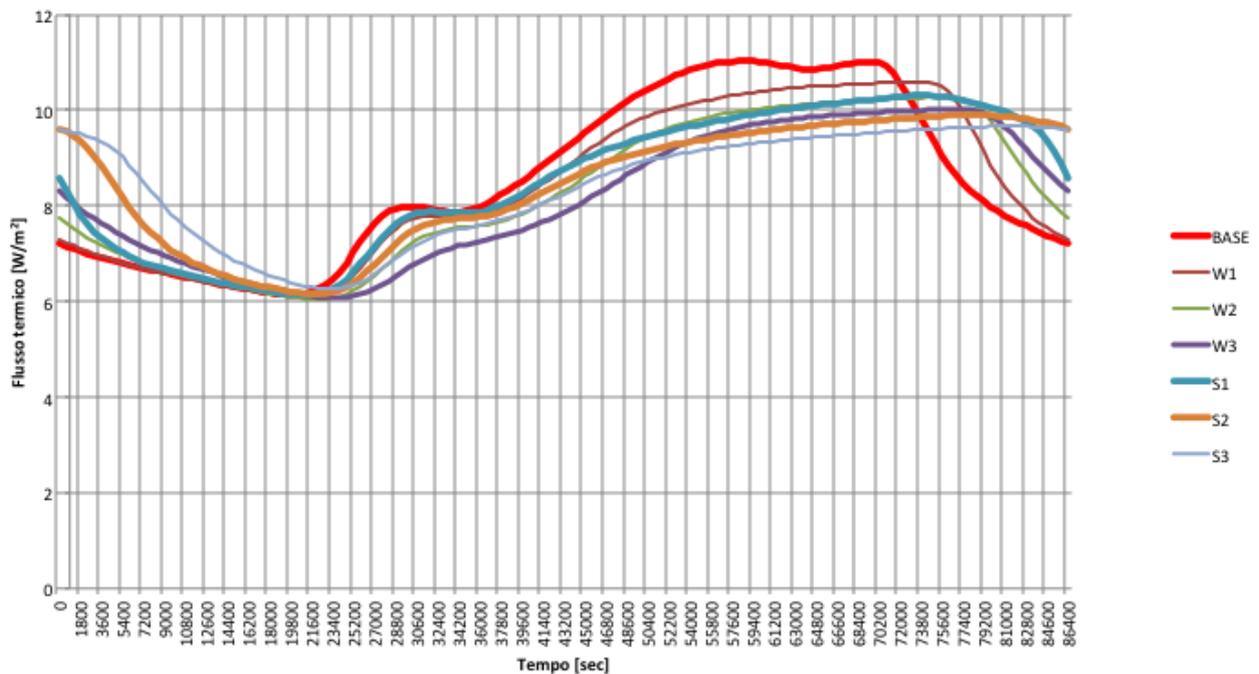




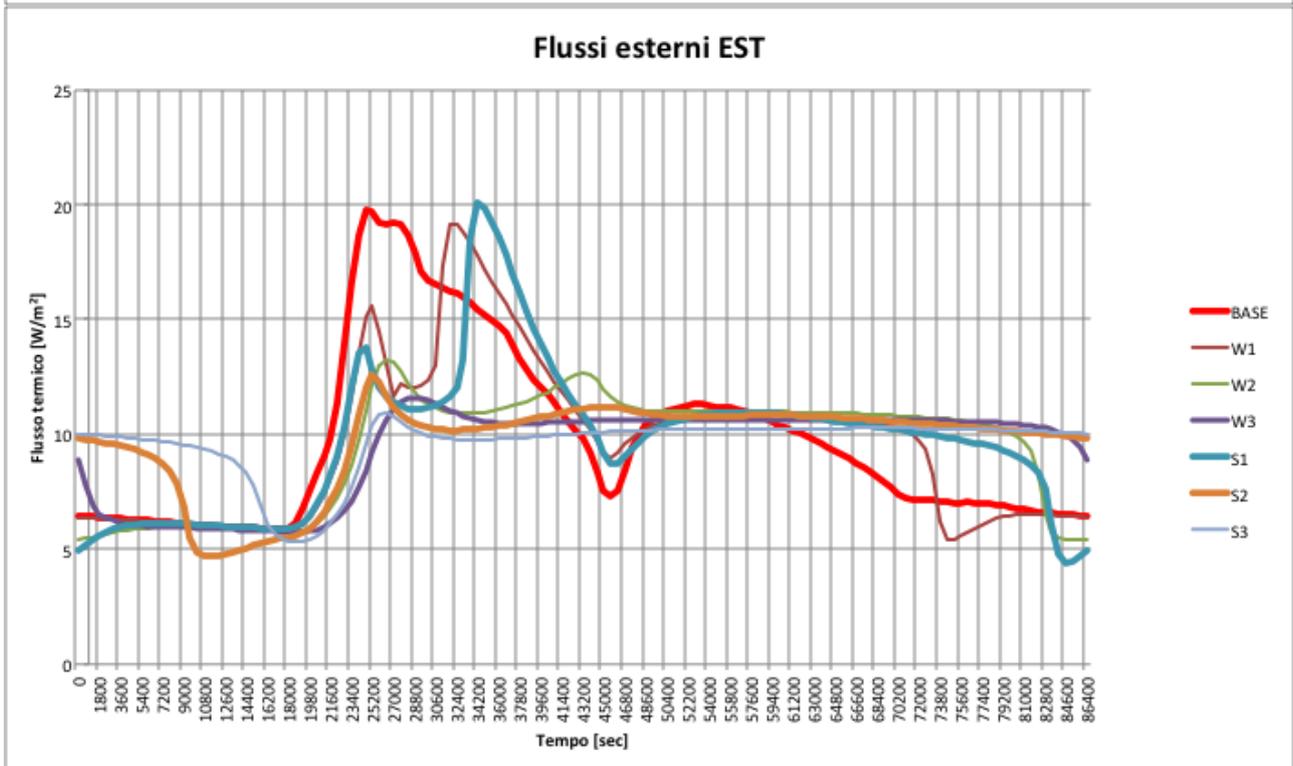
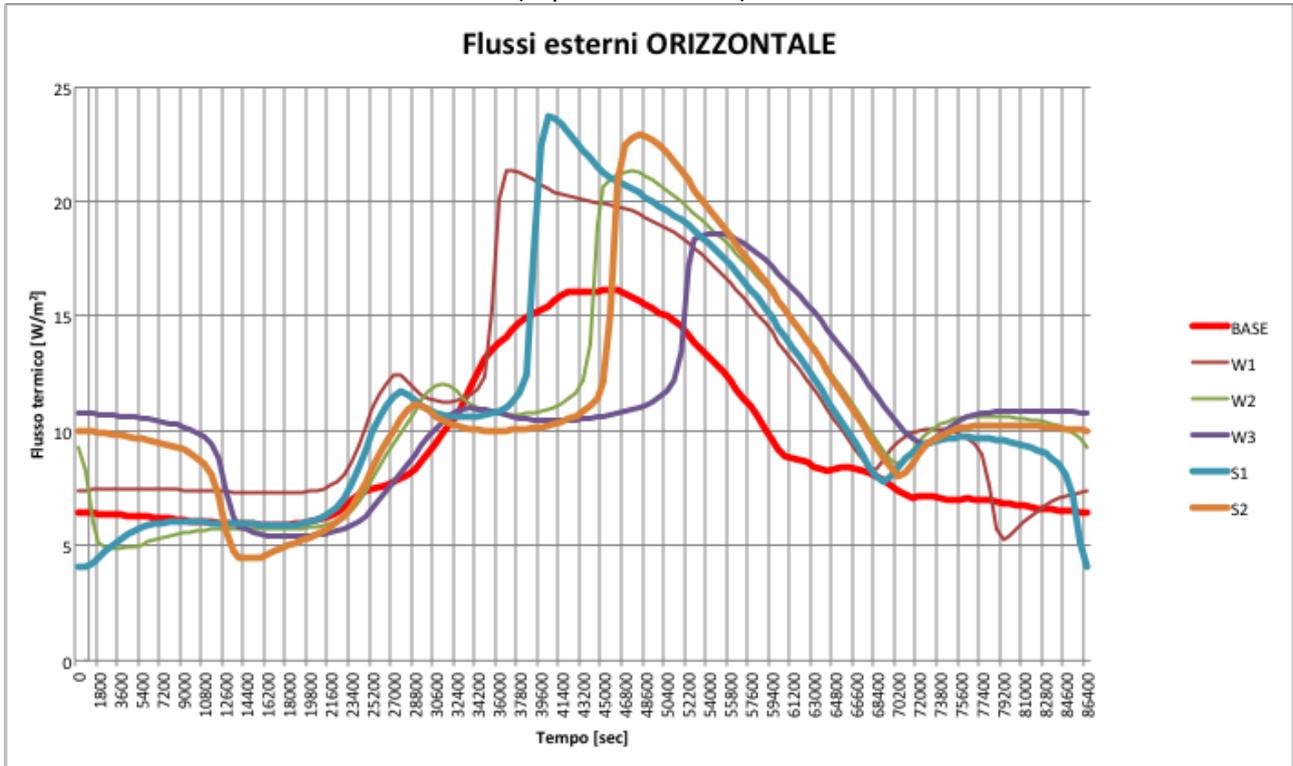
### Flussi interni OVEST



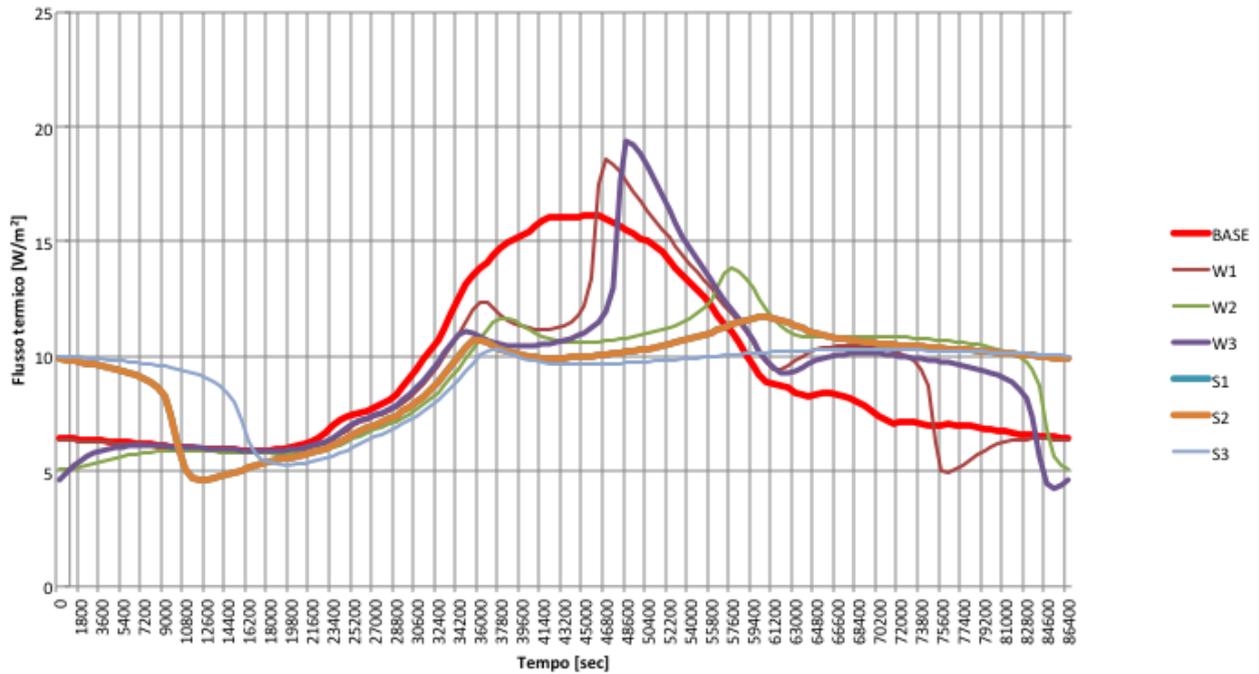
### Flussi interni NORD



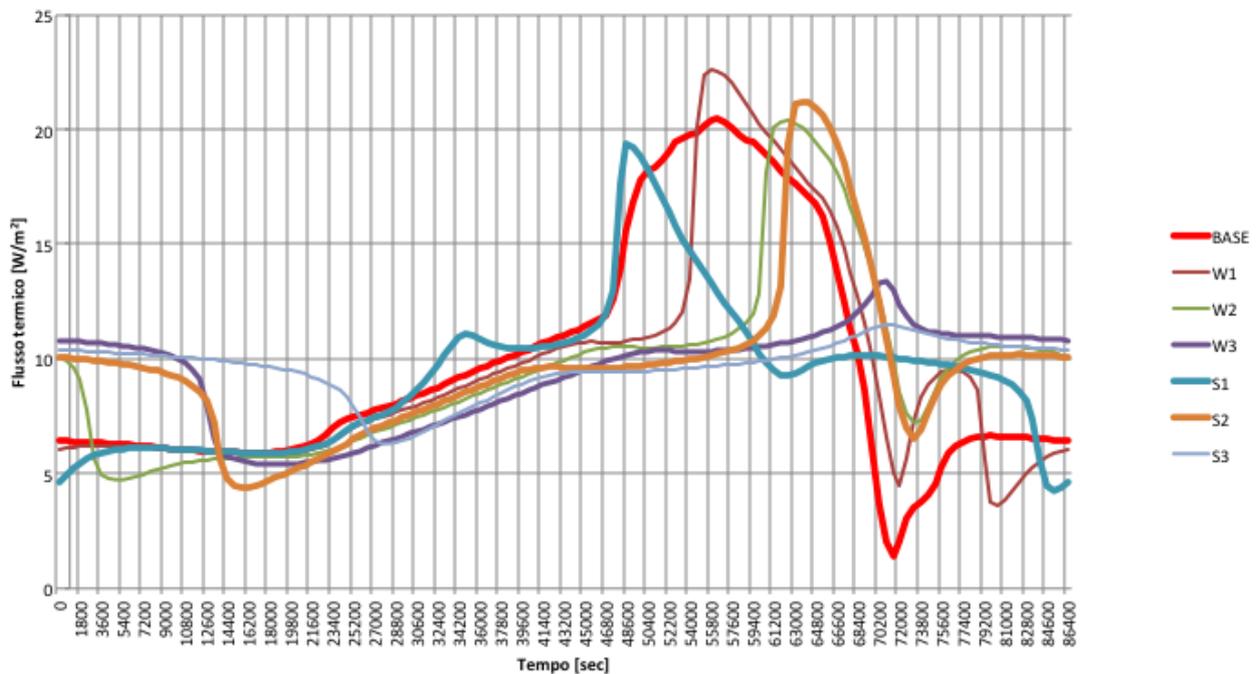
CONFRONTI: FLUSSO TERMICO ENTRANTE (superficie esterna)

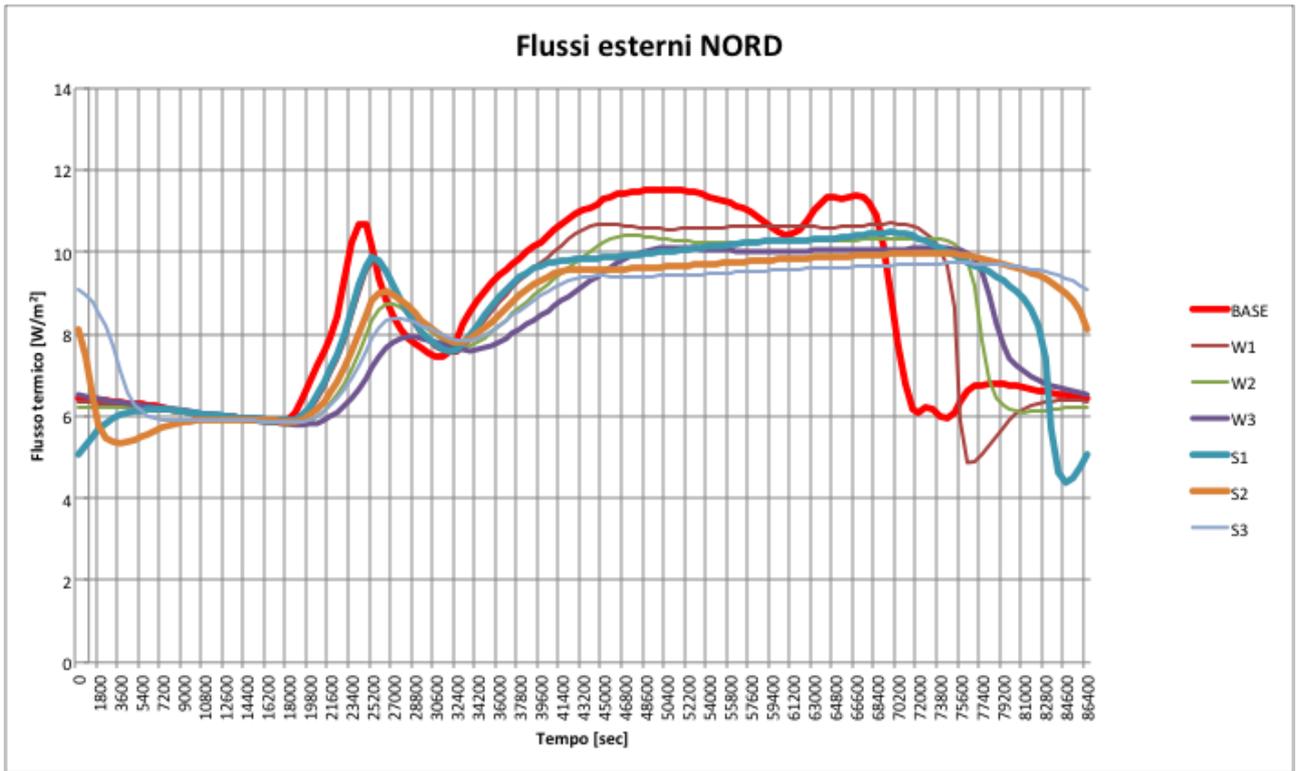


### Flussi esterni SUD

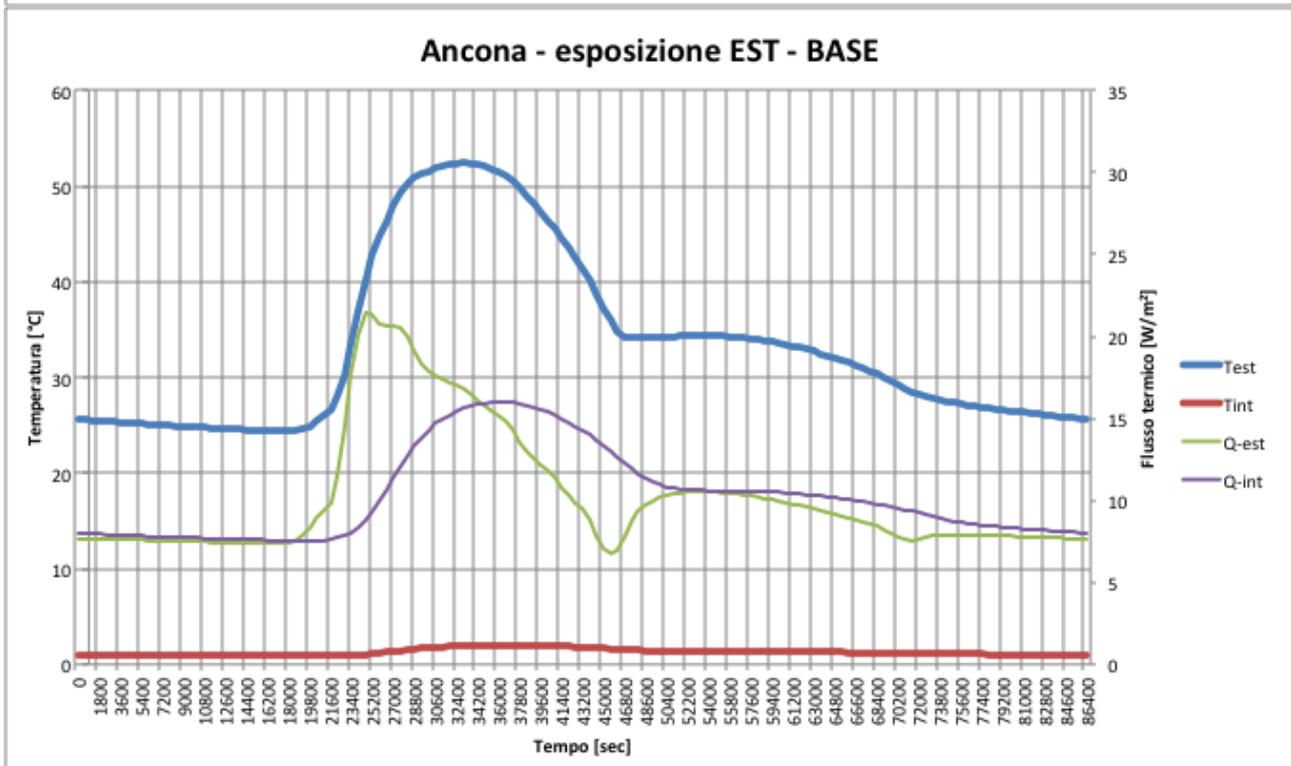
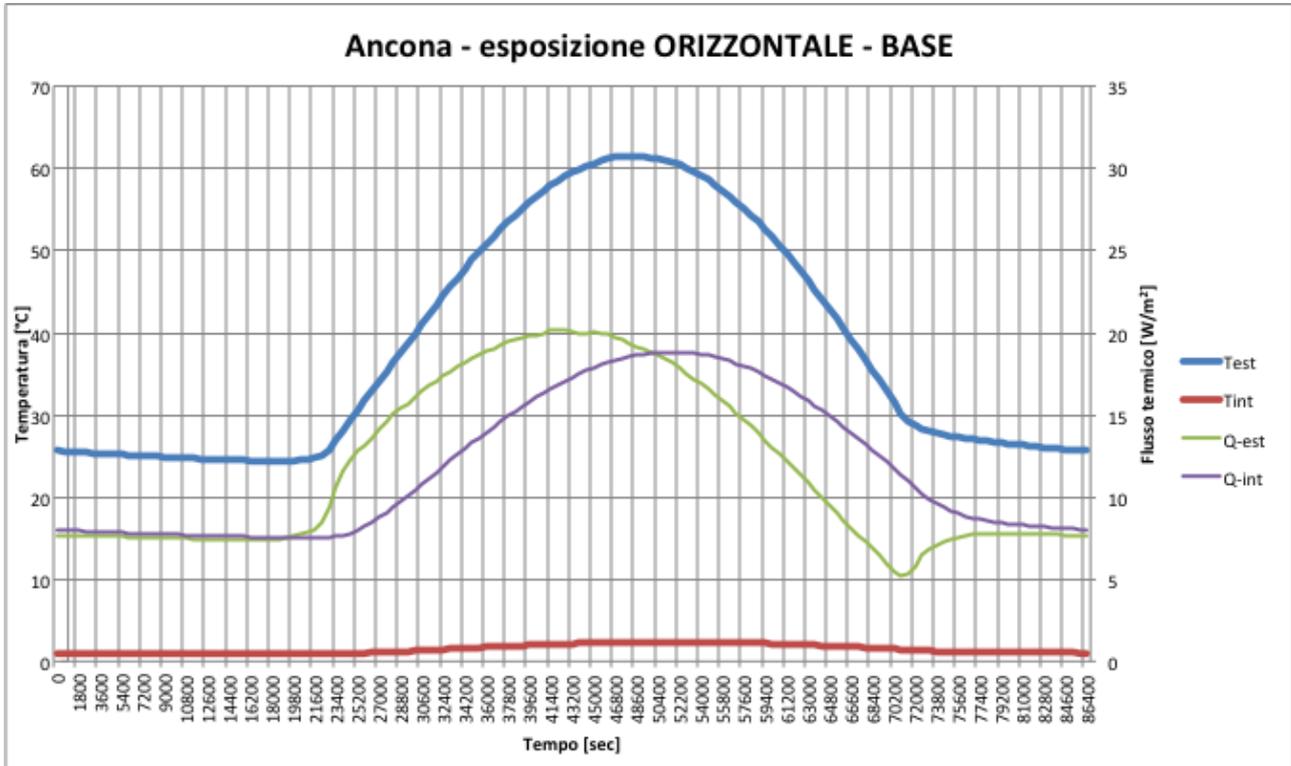


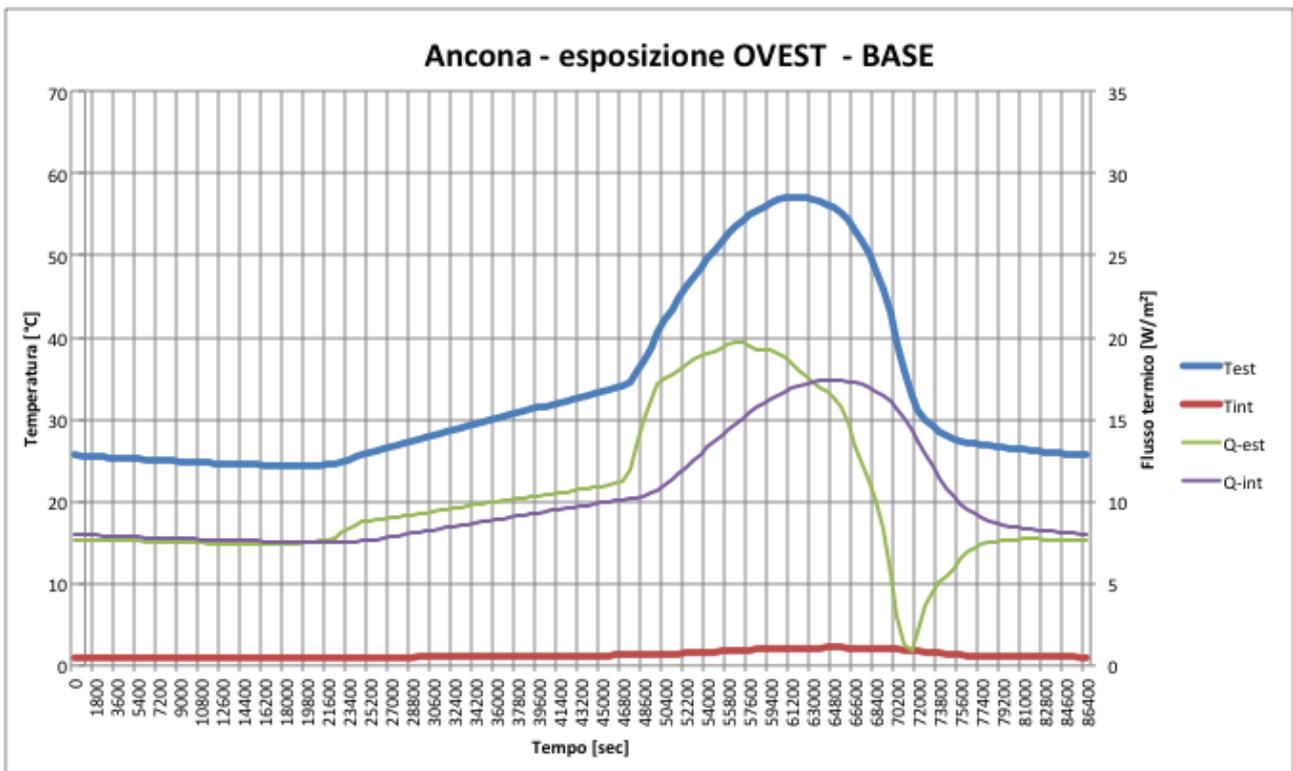
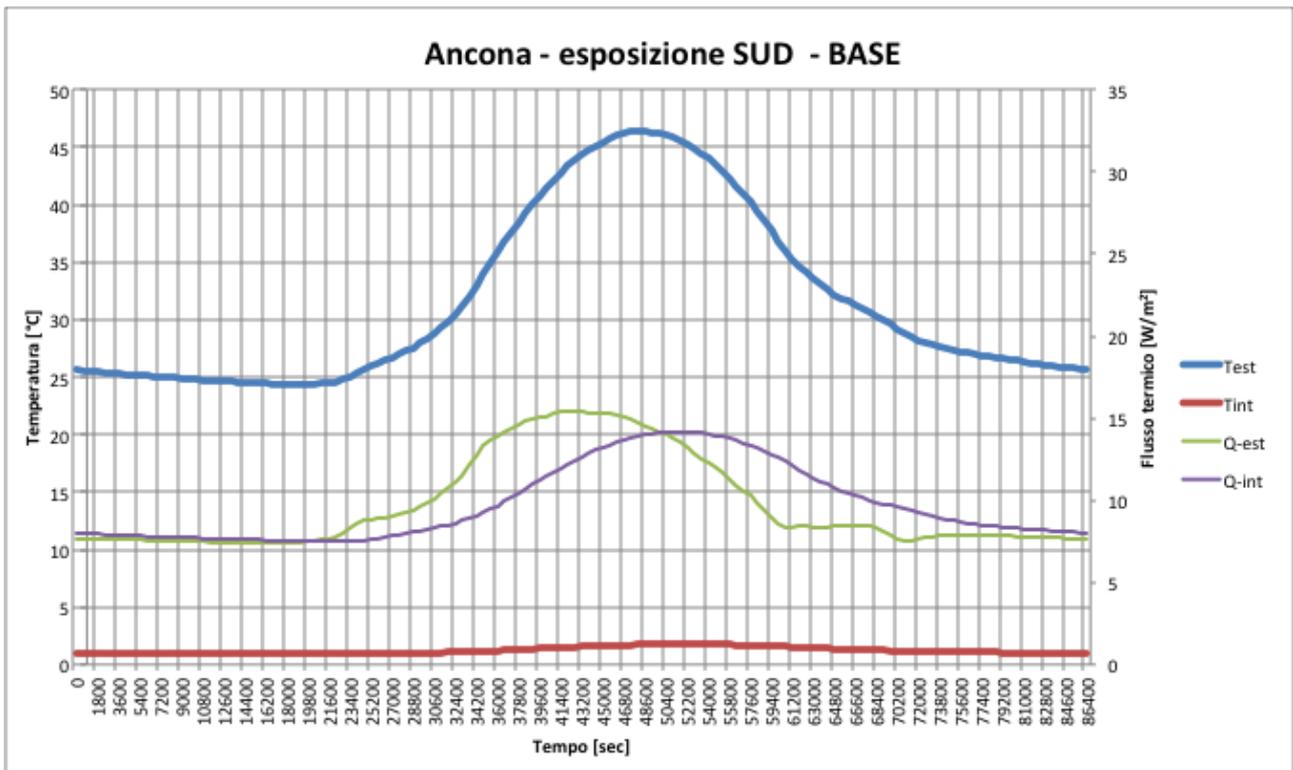
### Flussi esterni OVEST

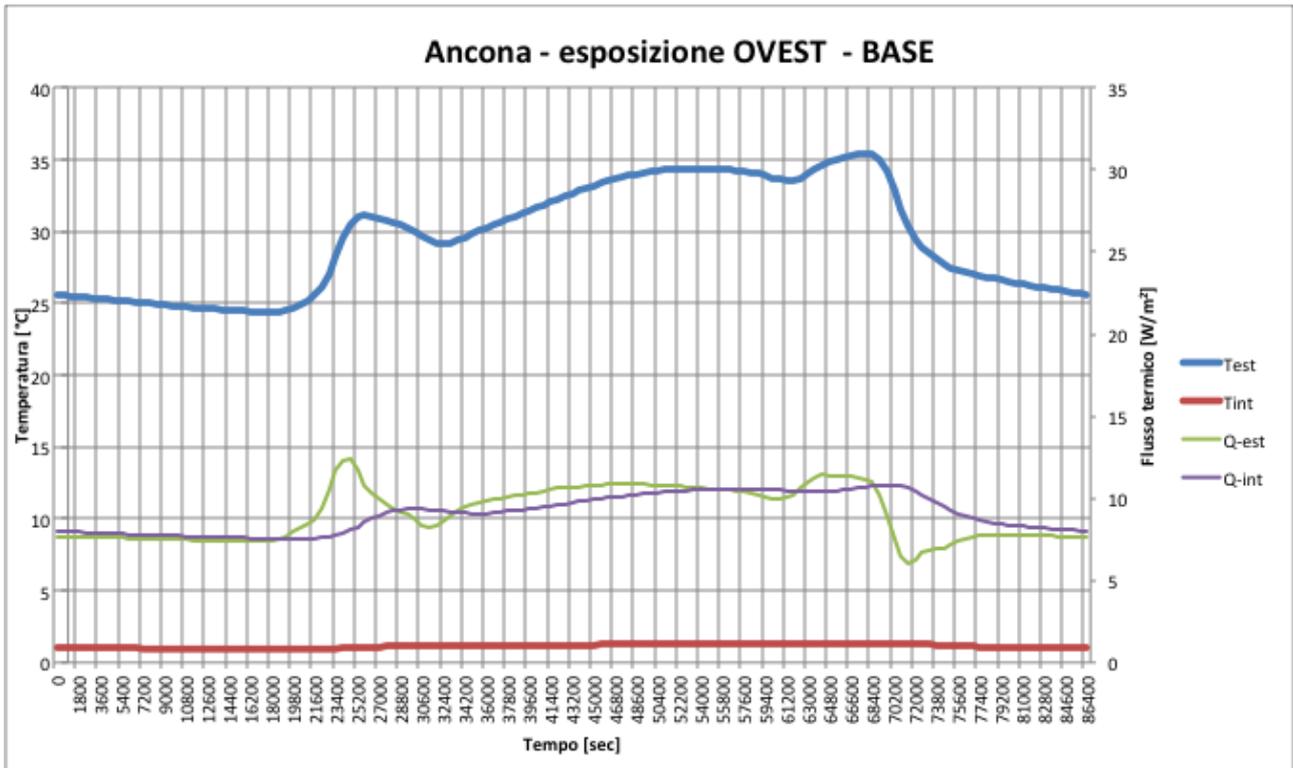




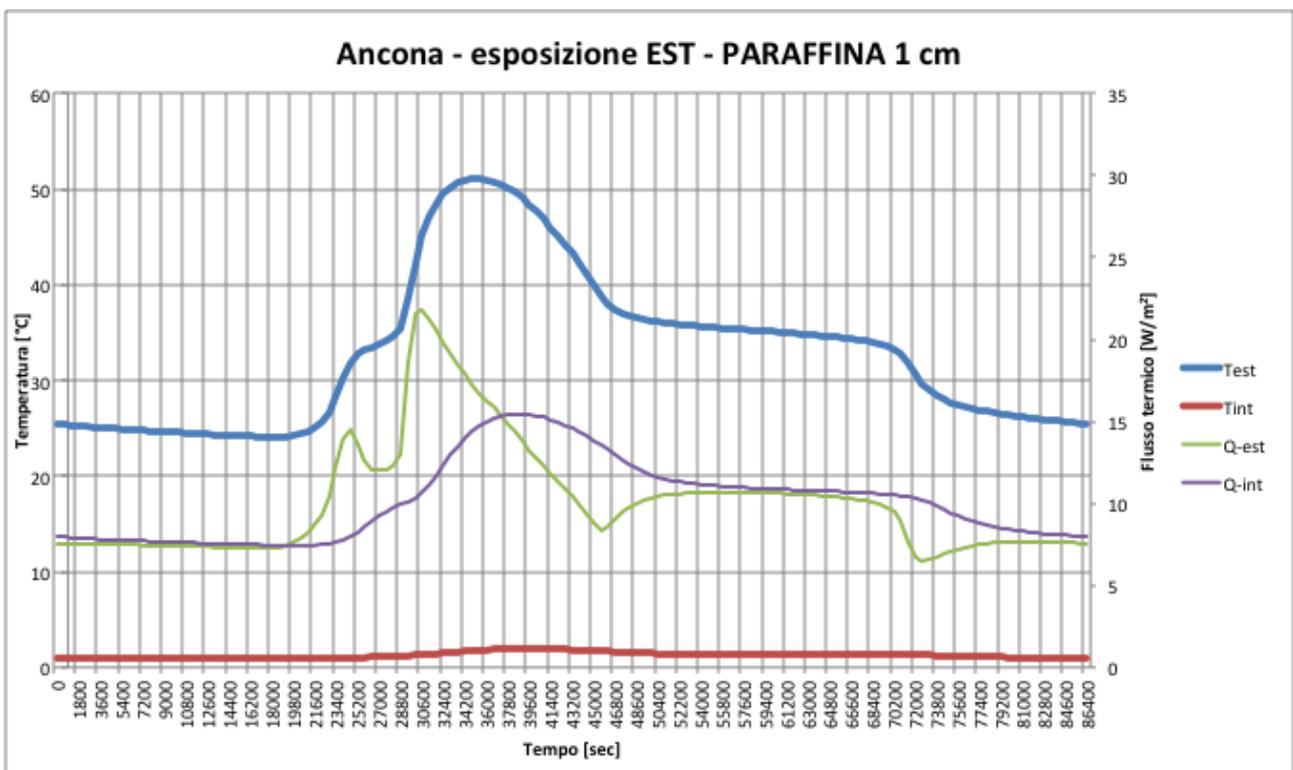
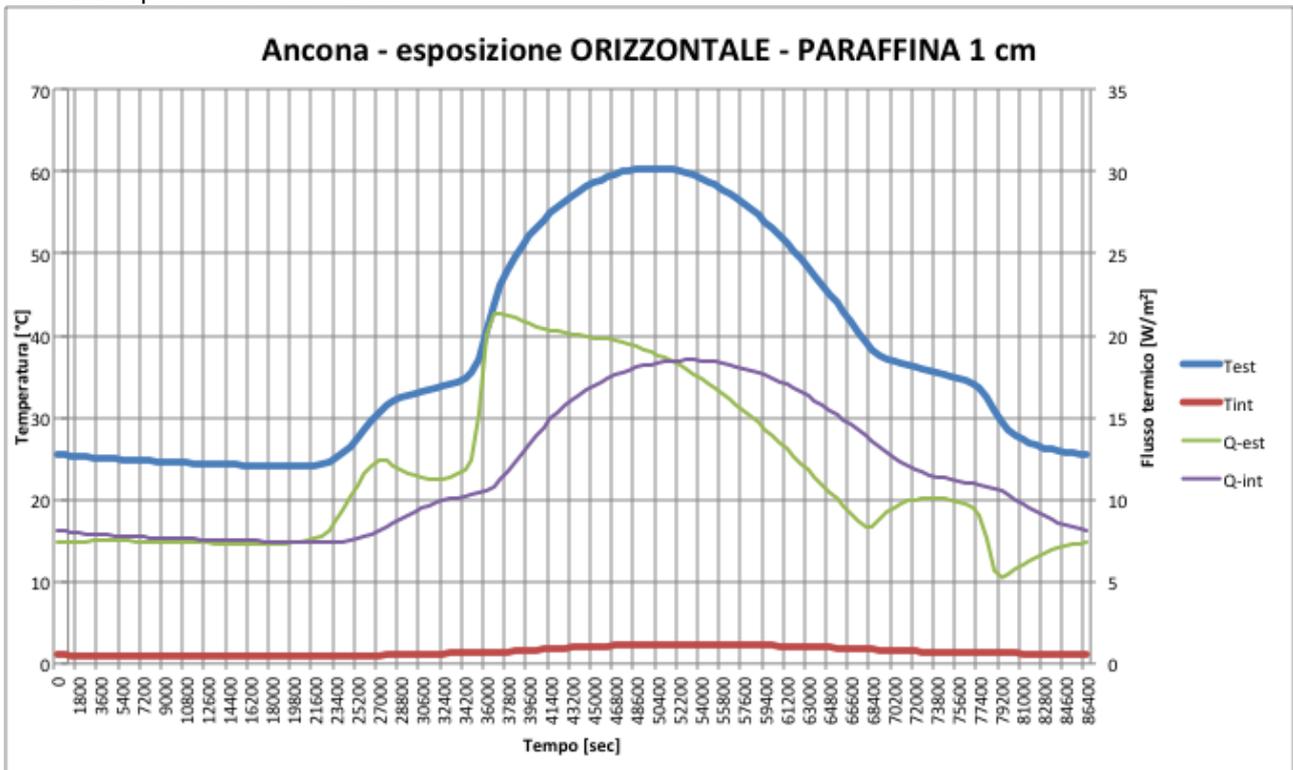
LOCALITÀ CLIMATICA: ANCONA  
MODELLO: BASE

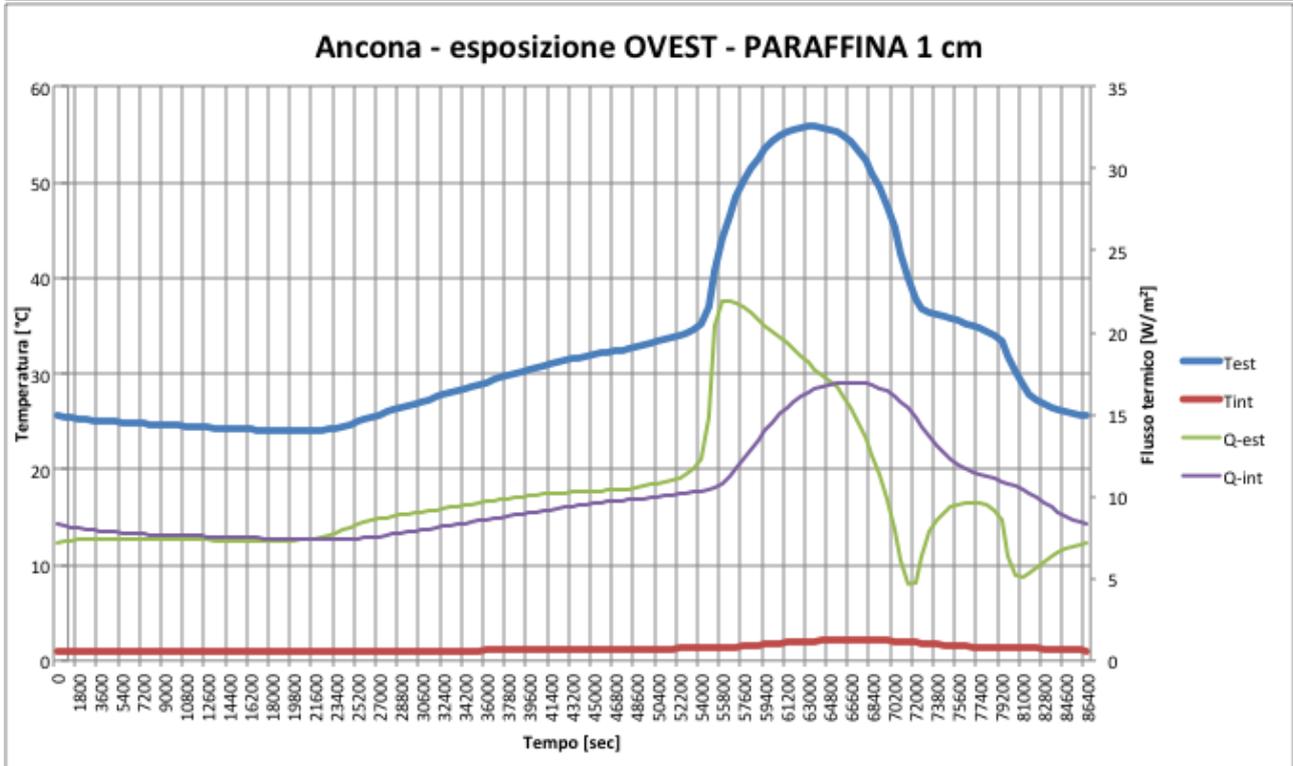
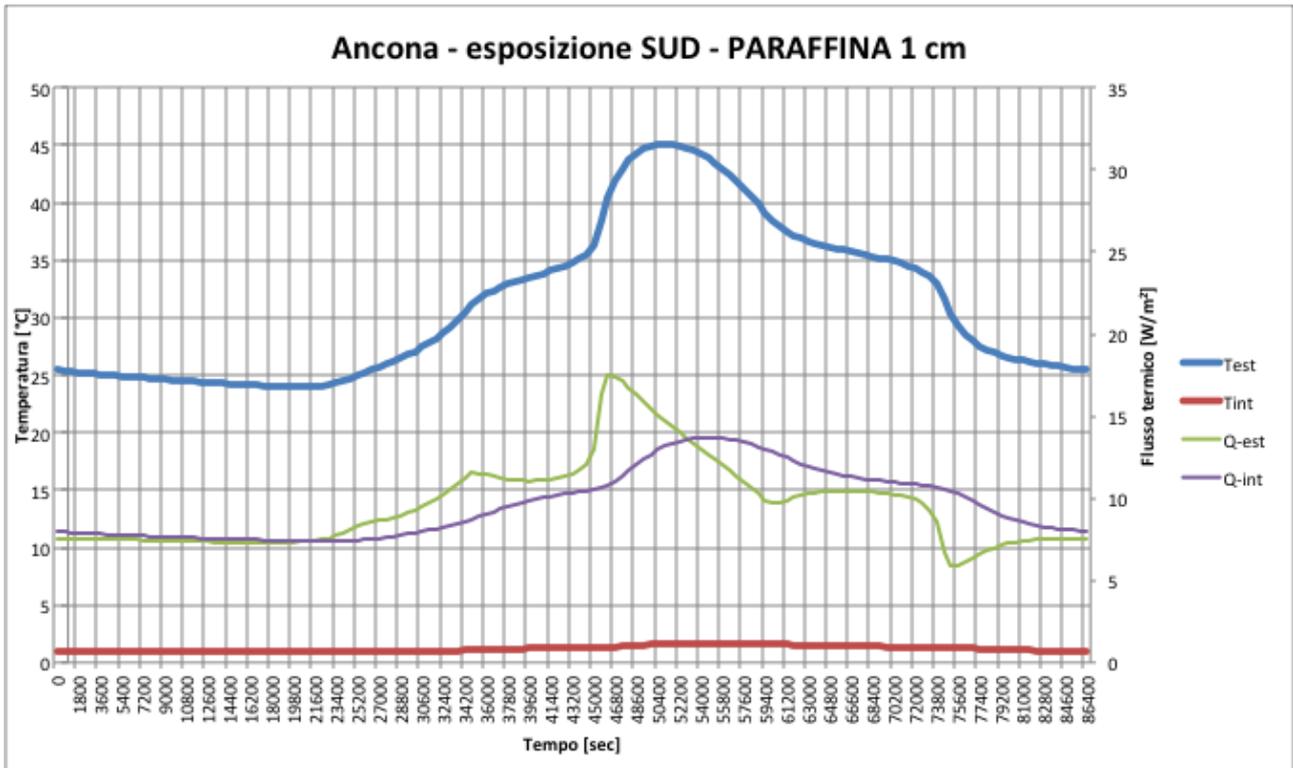


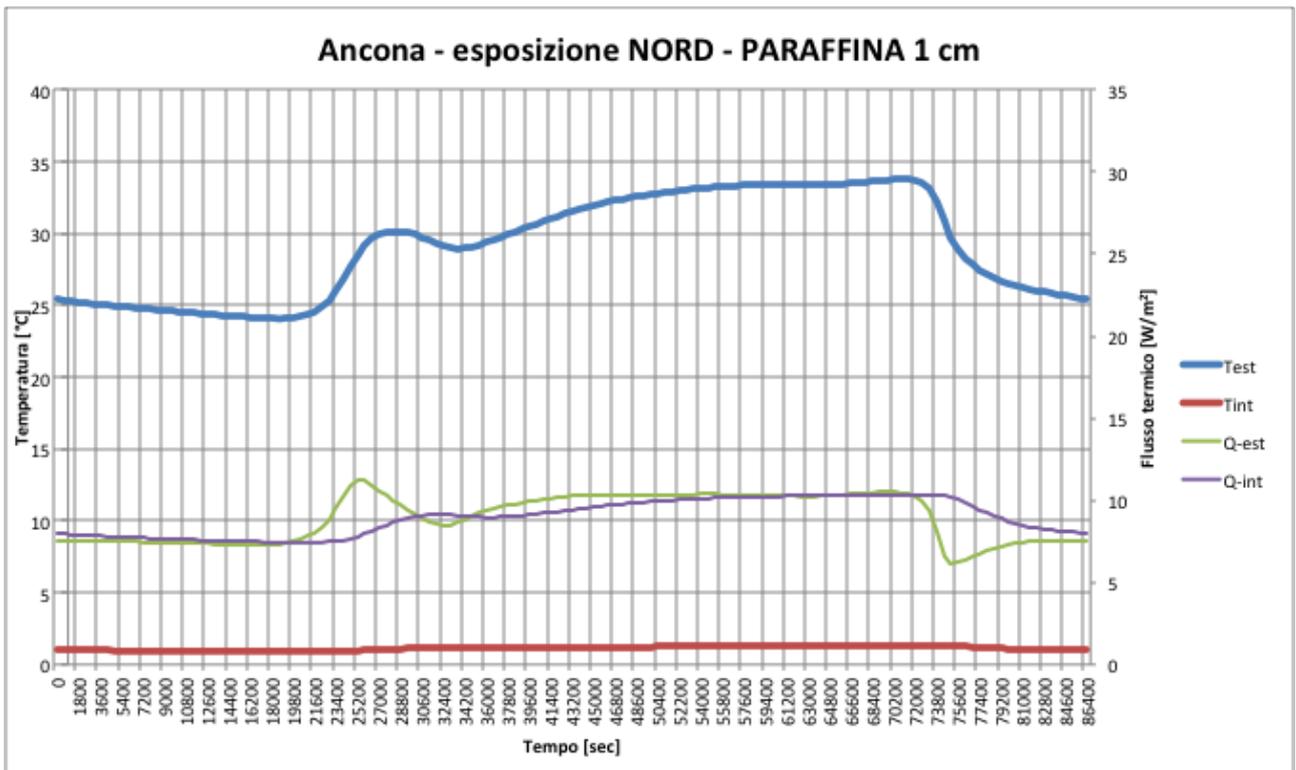




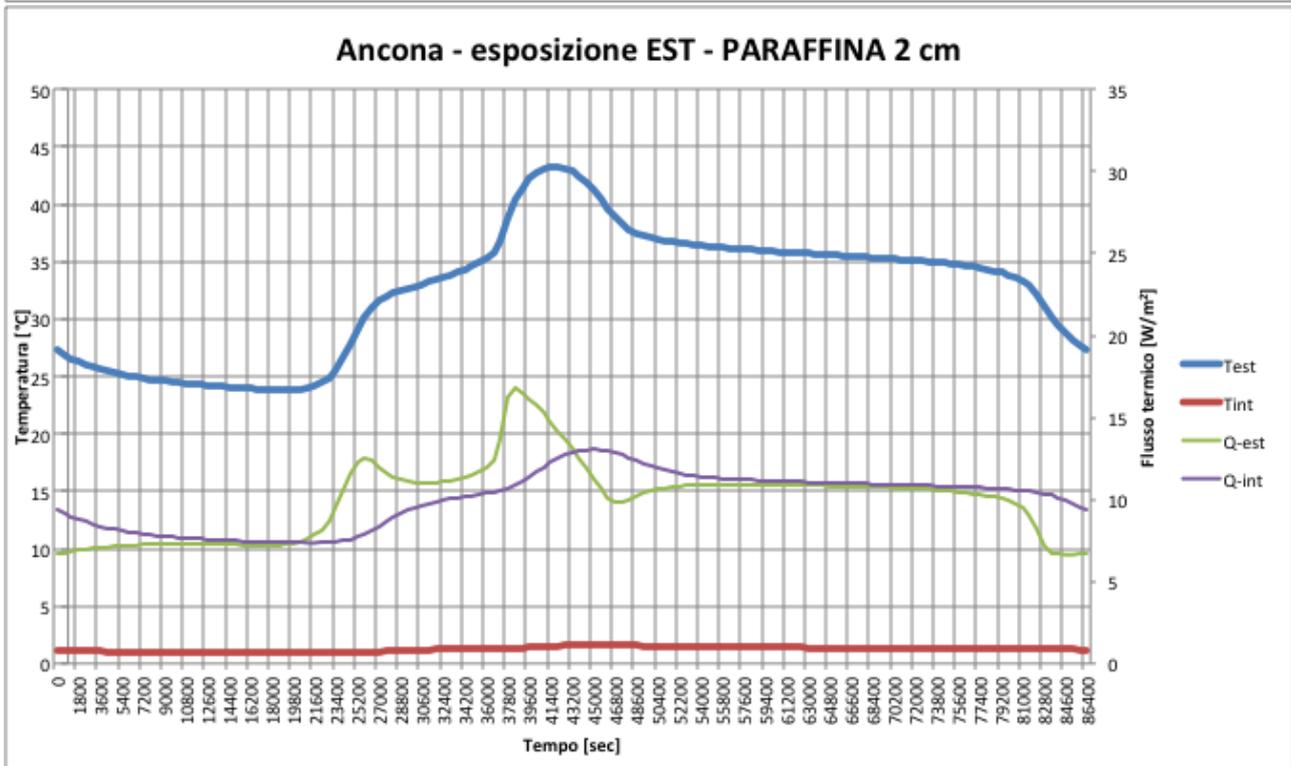
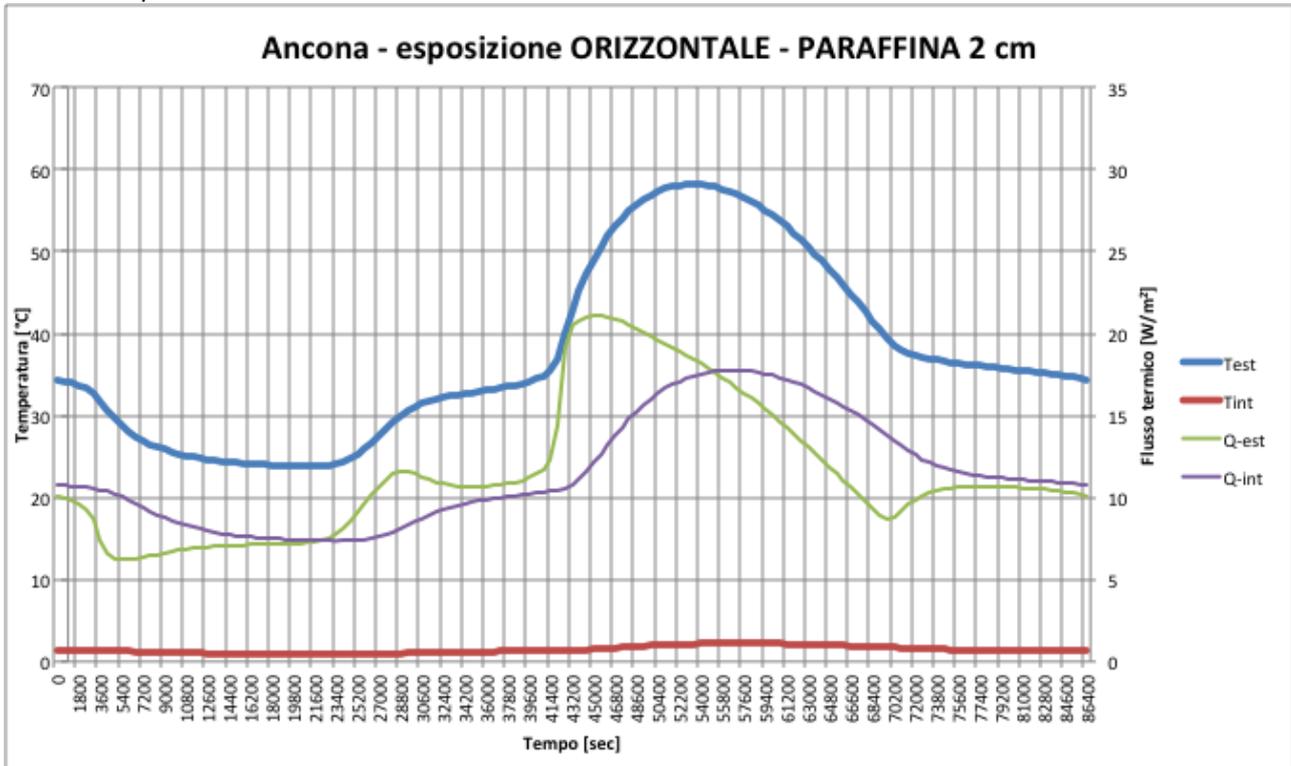
MODELLO: paraffina RT35 – 1 cm

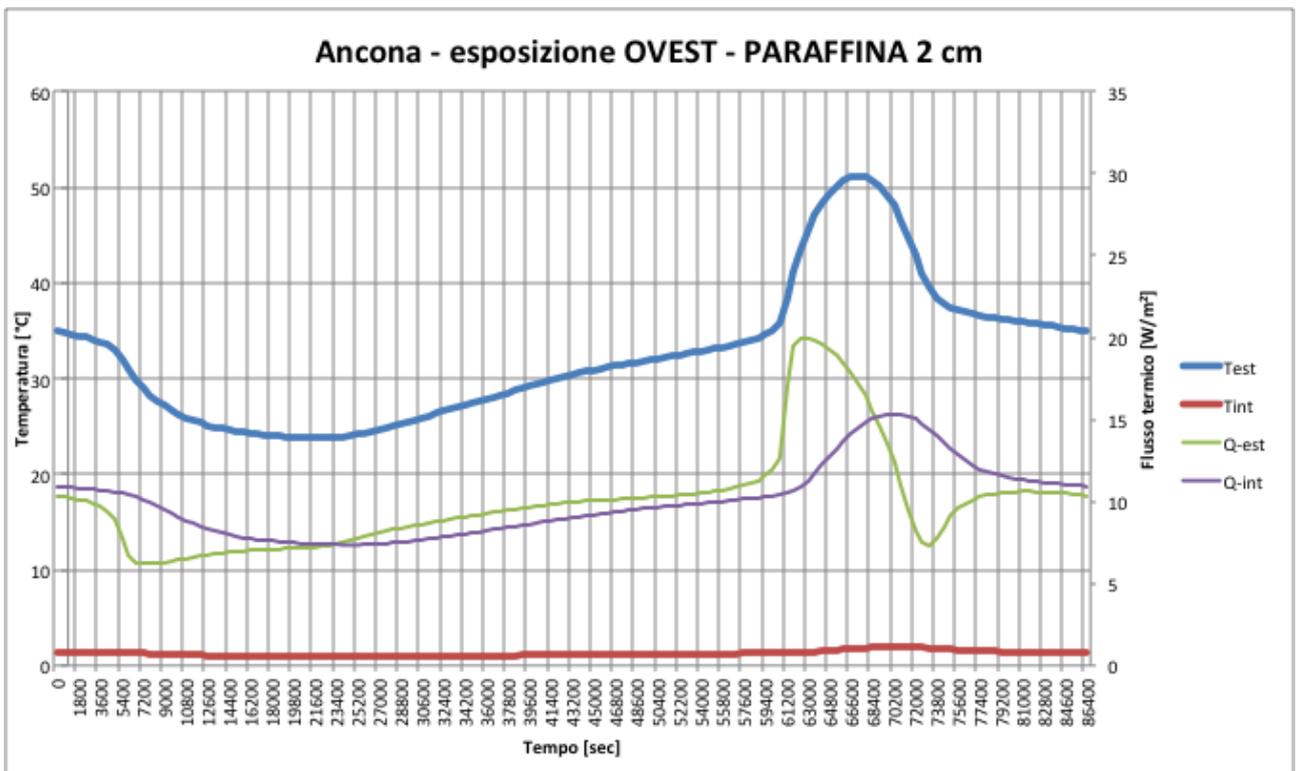
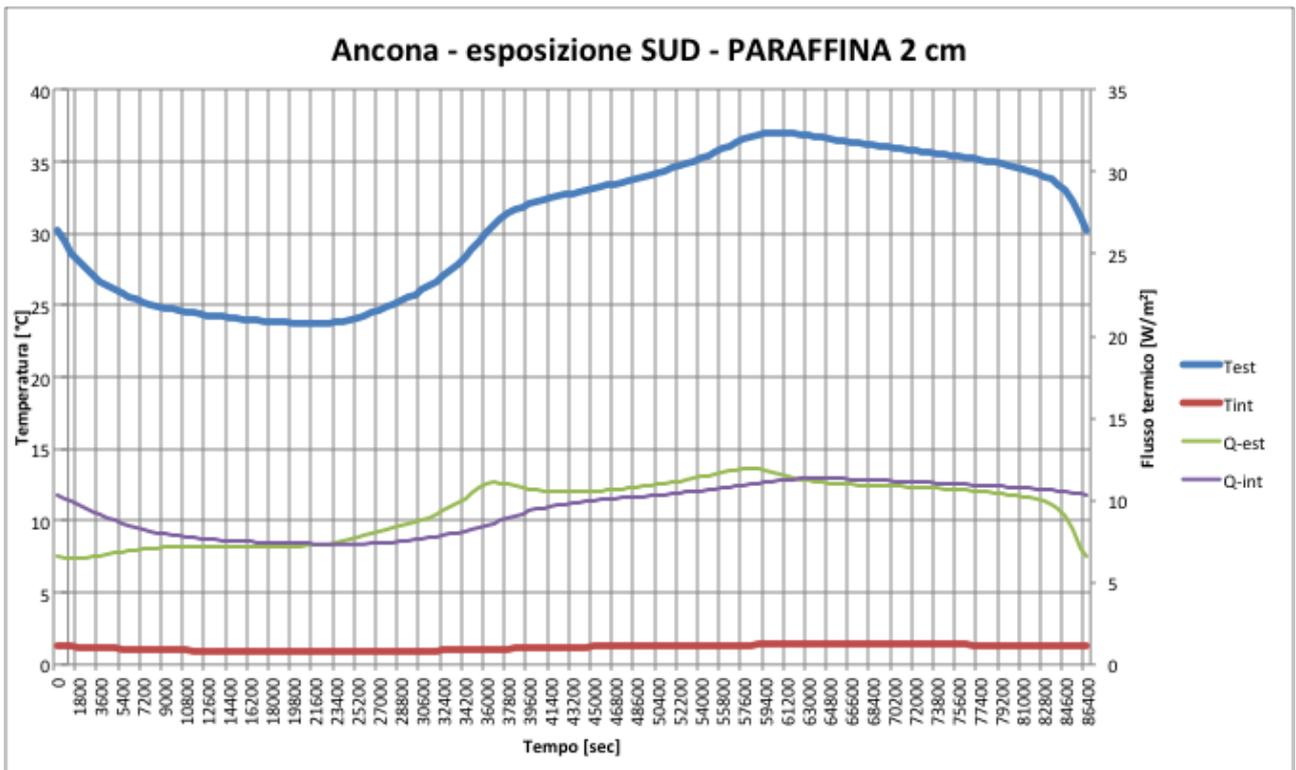


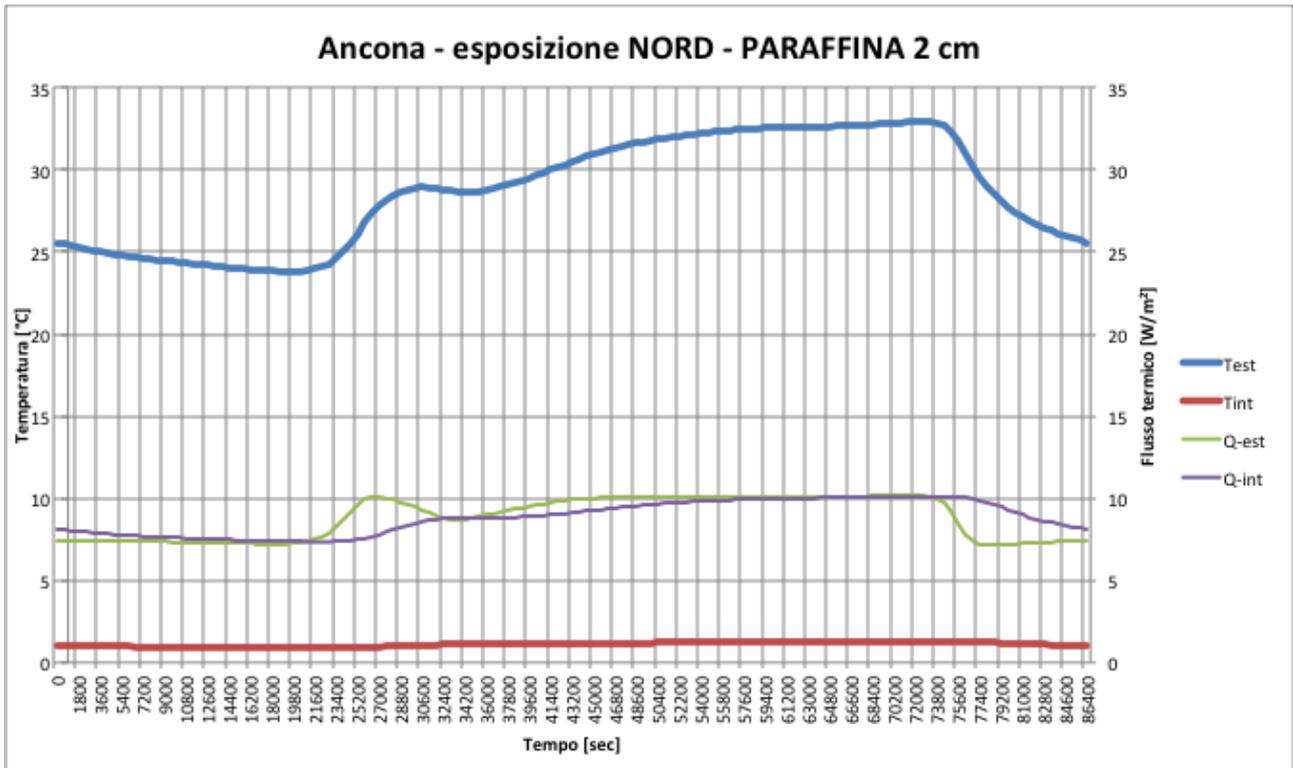




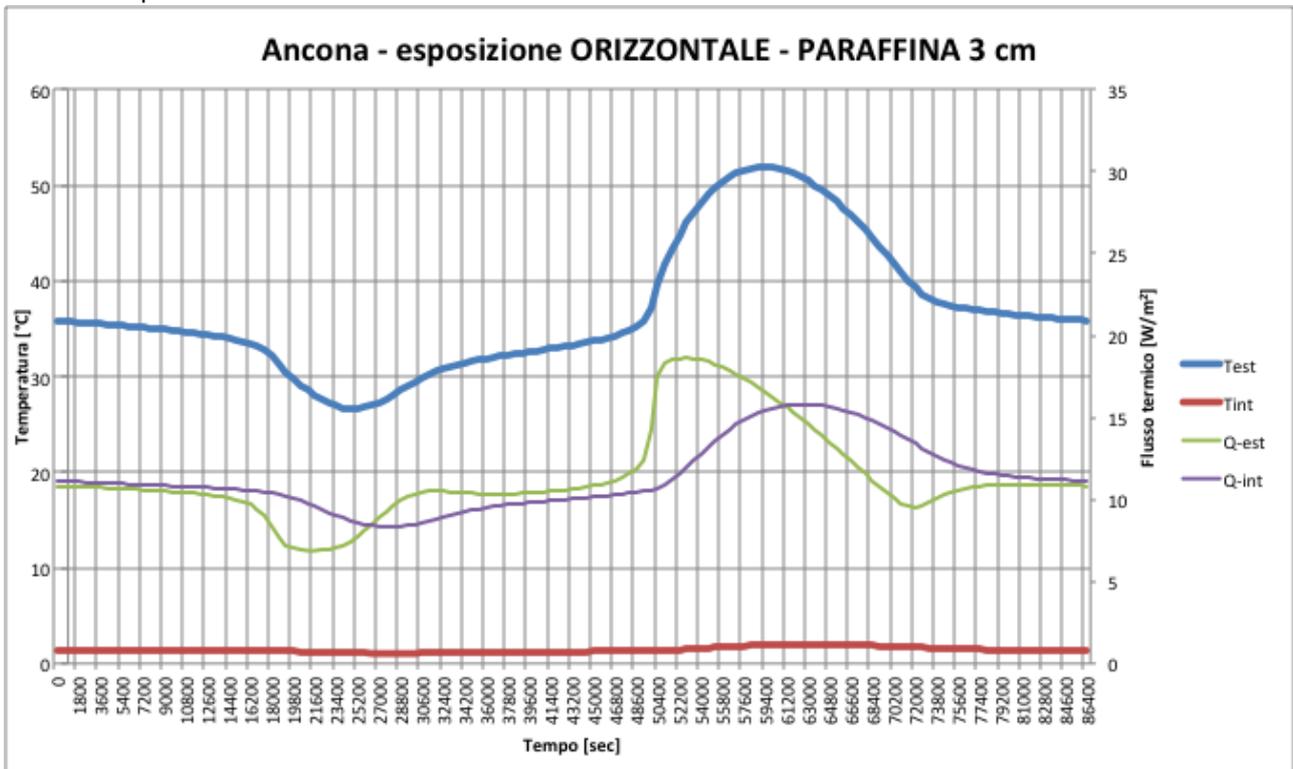
MODELLO: paraffina RT35 – 2 cm

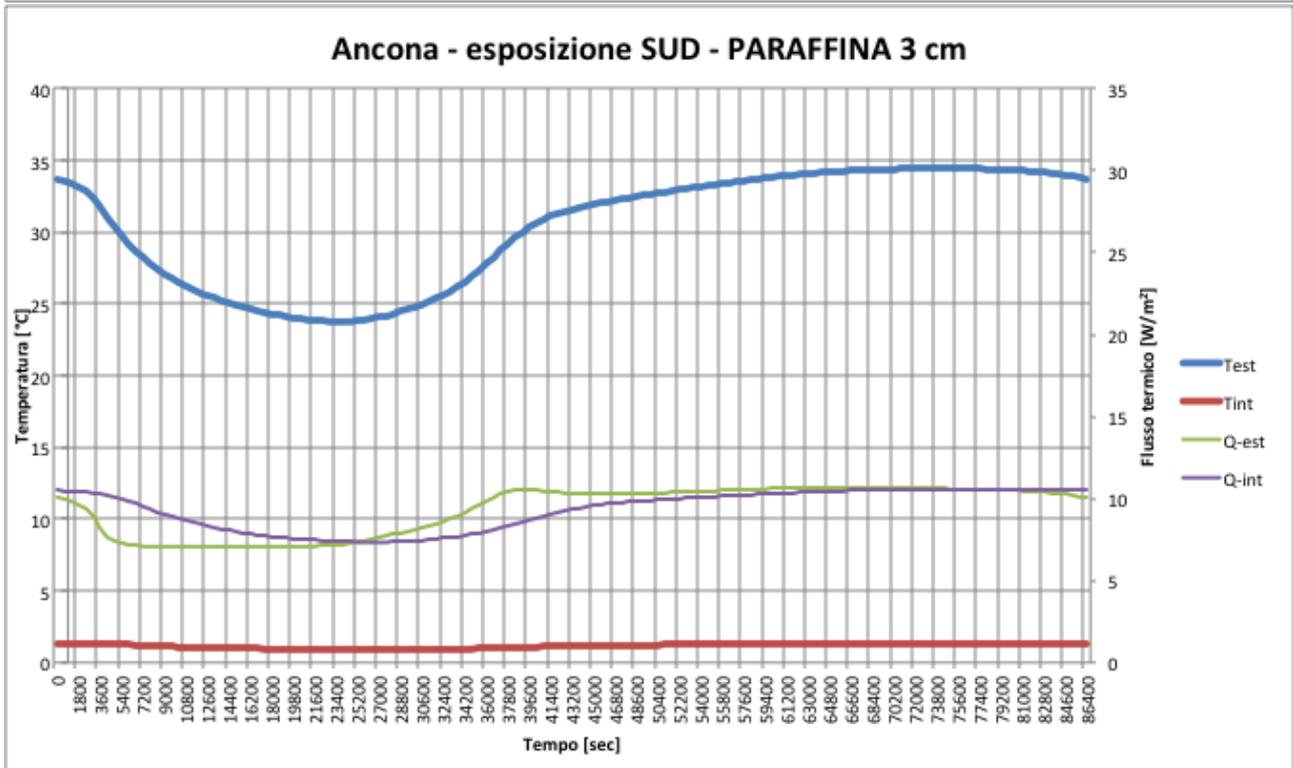
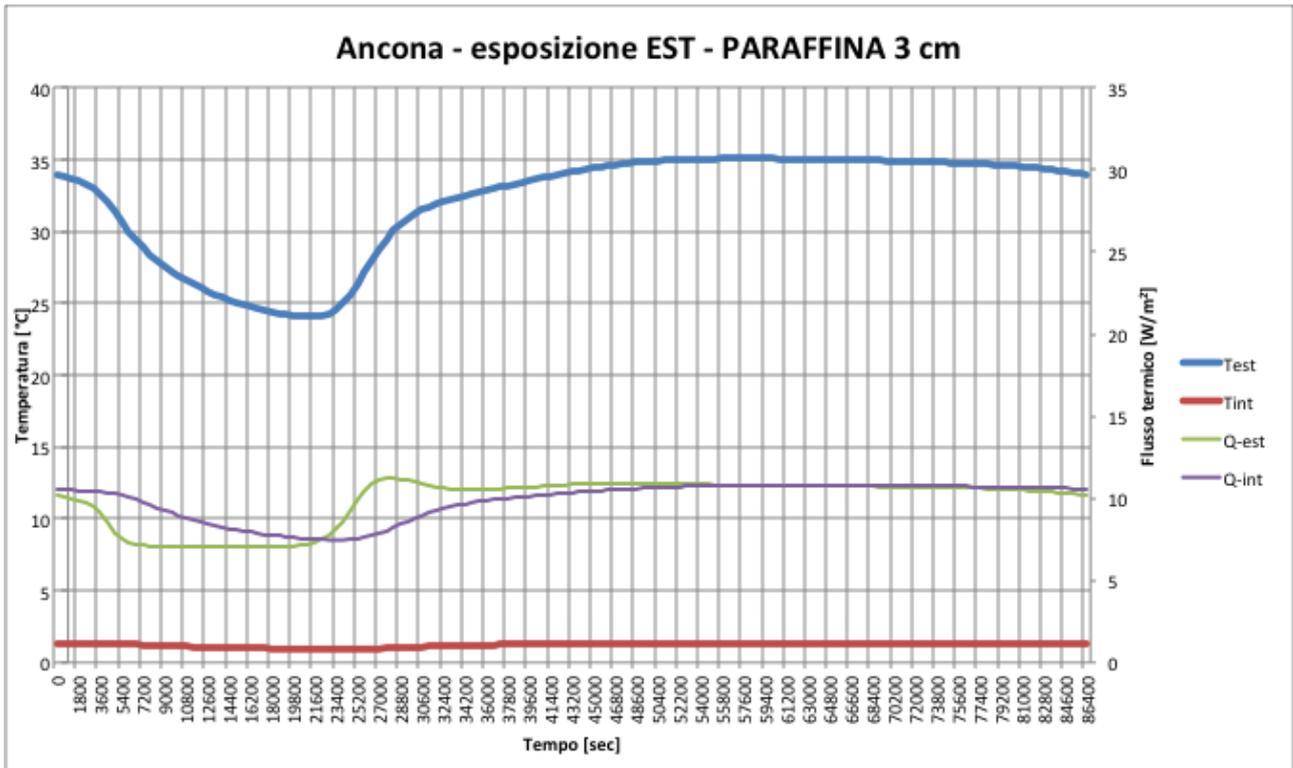


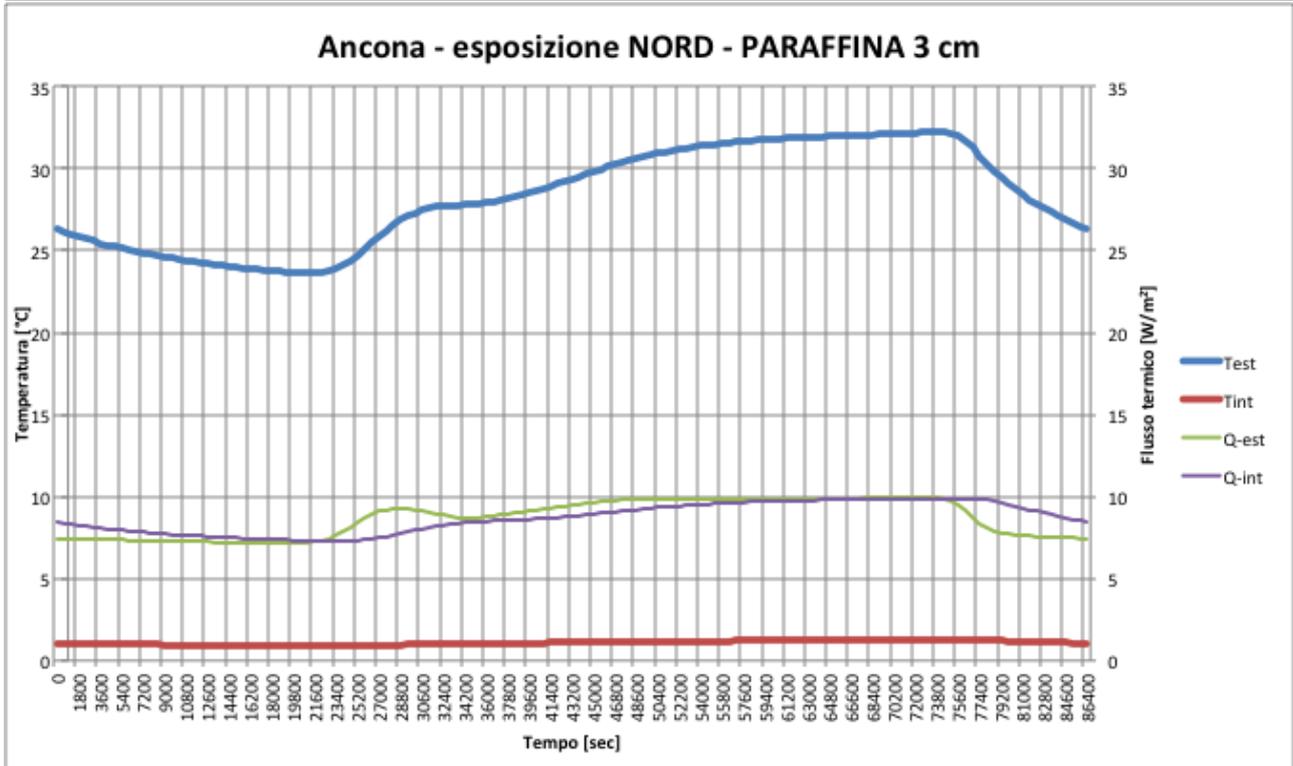
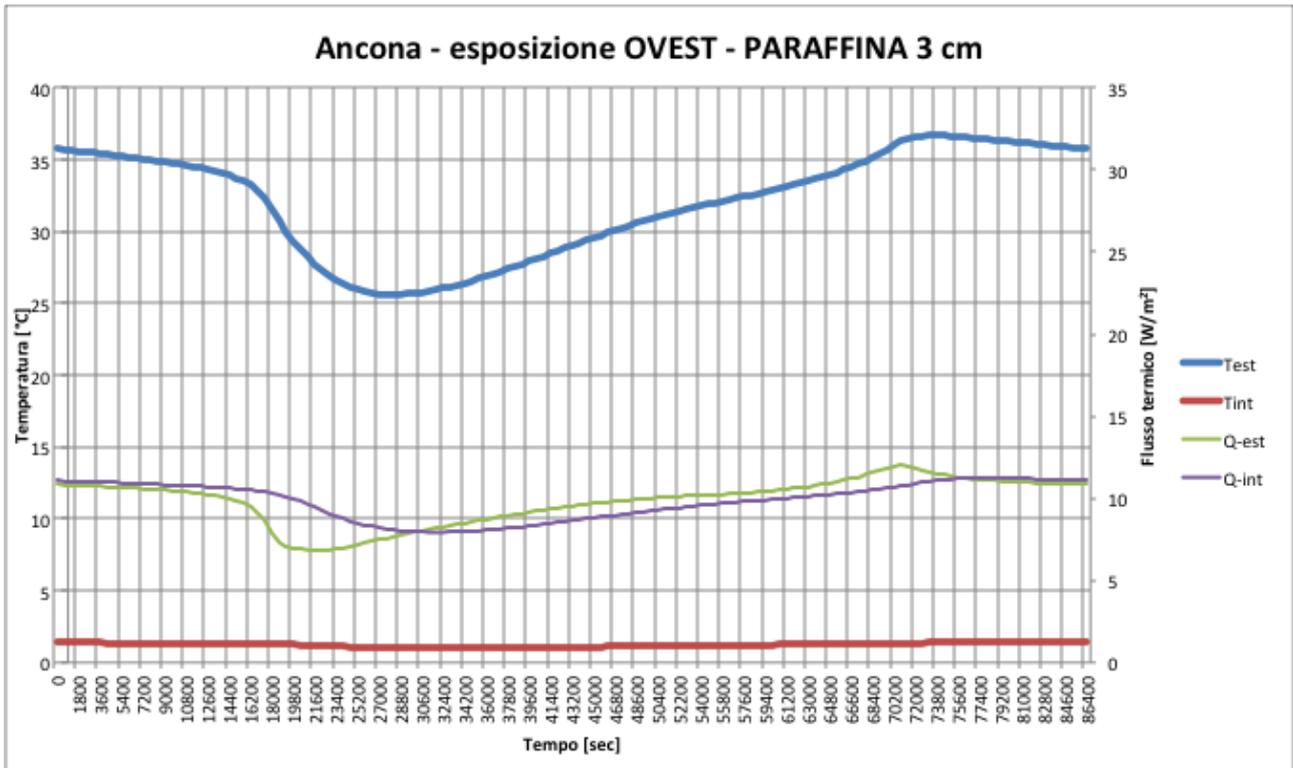




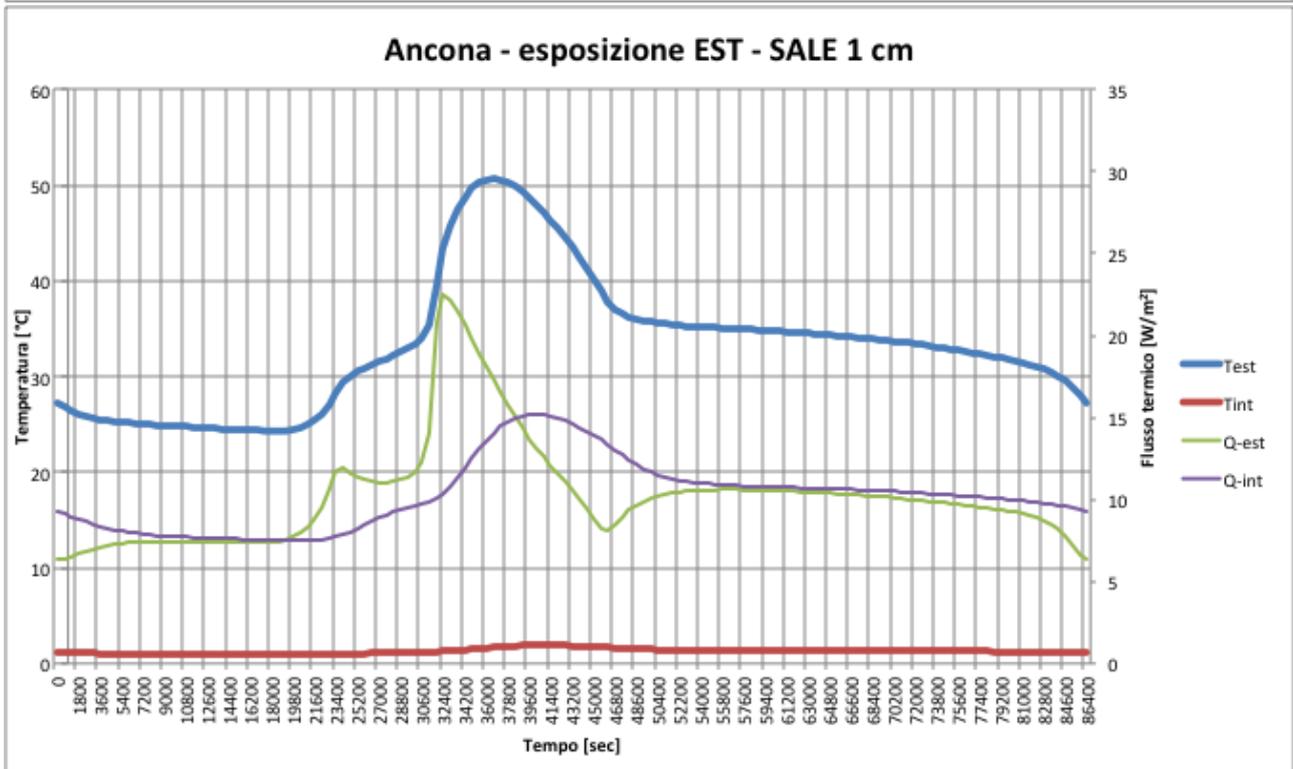
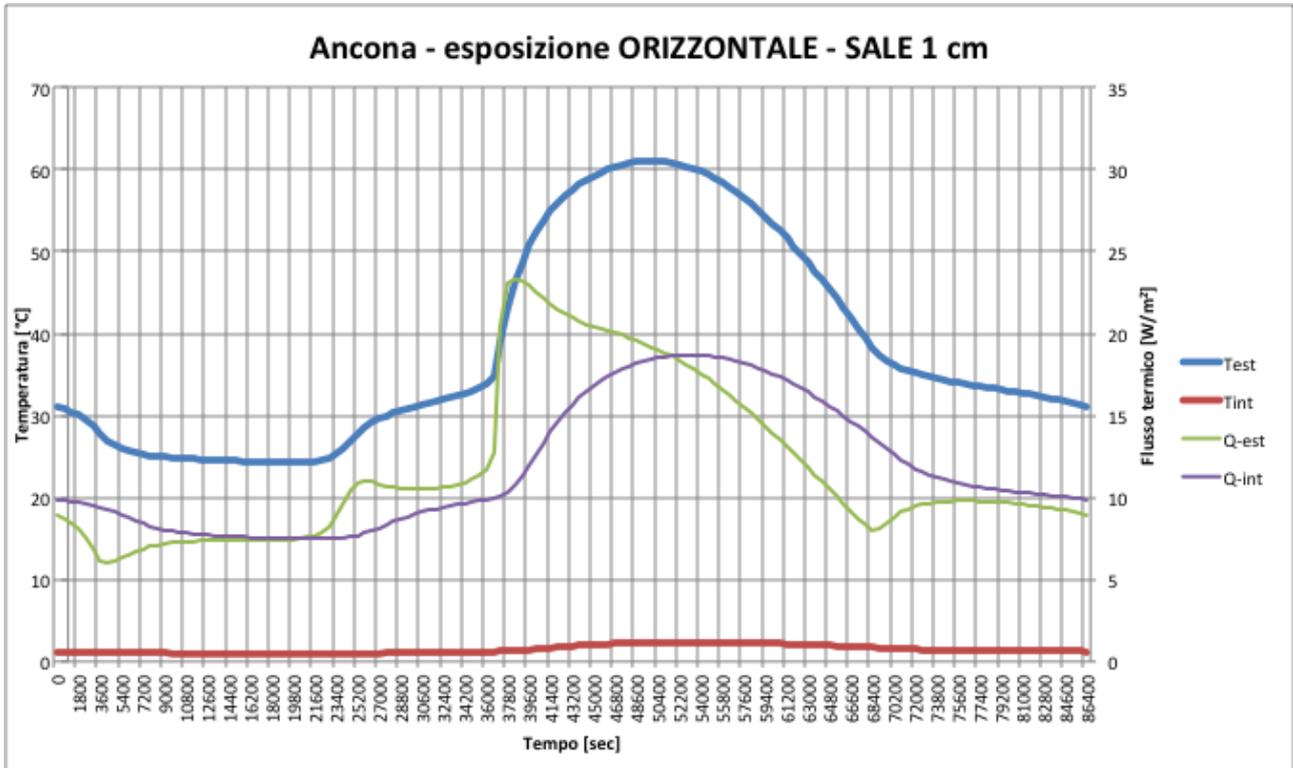
MODELLO: paraffina RT35 – 3 cm

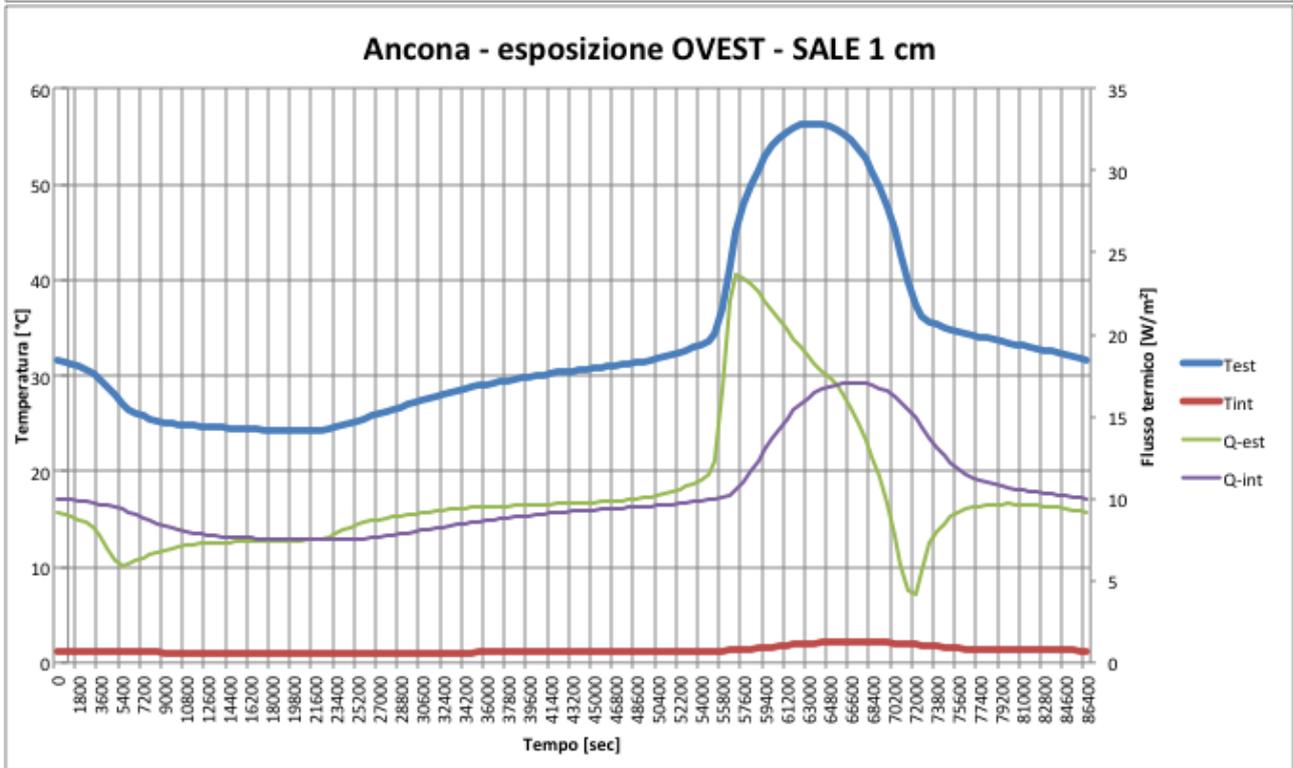
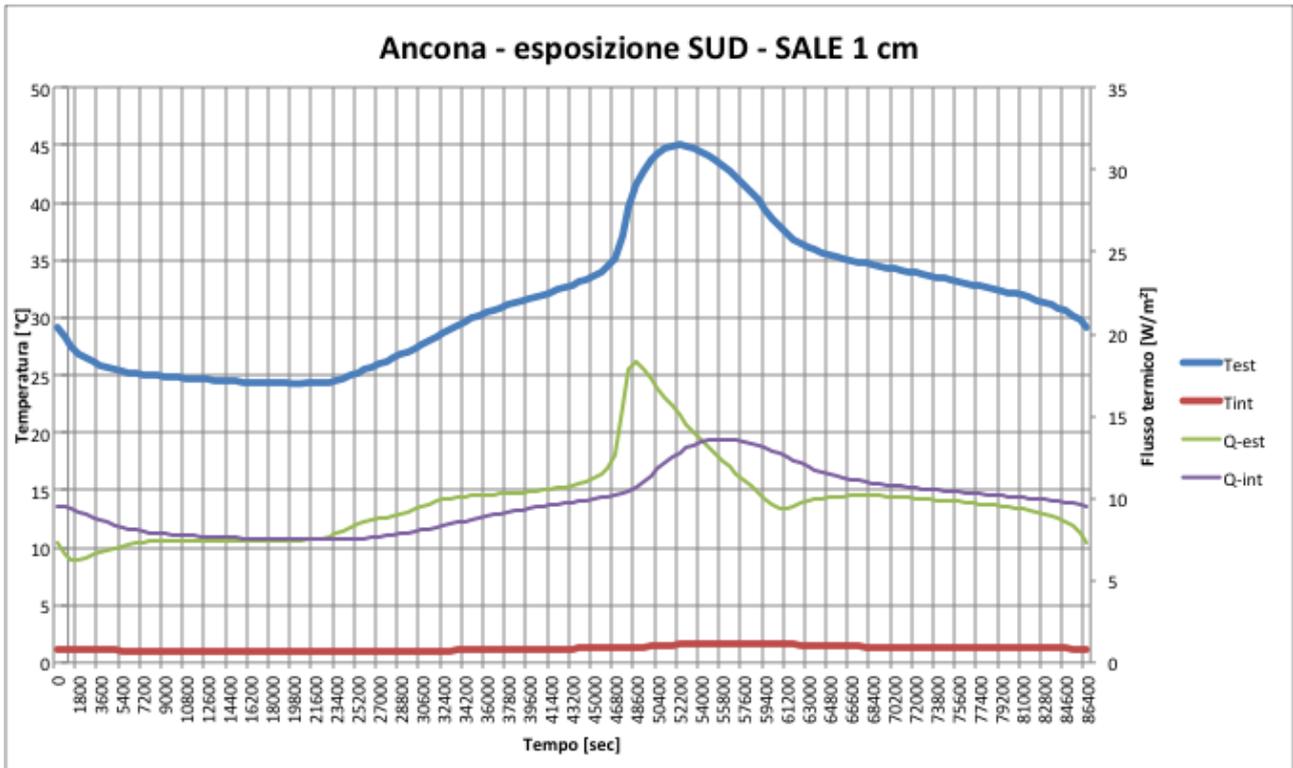


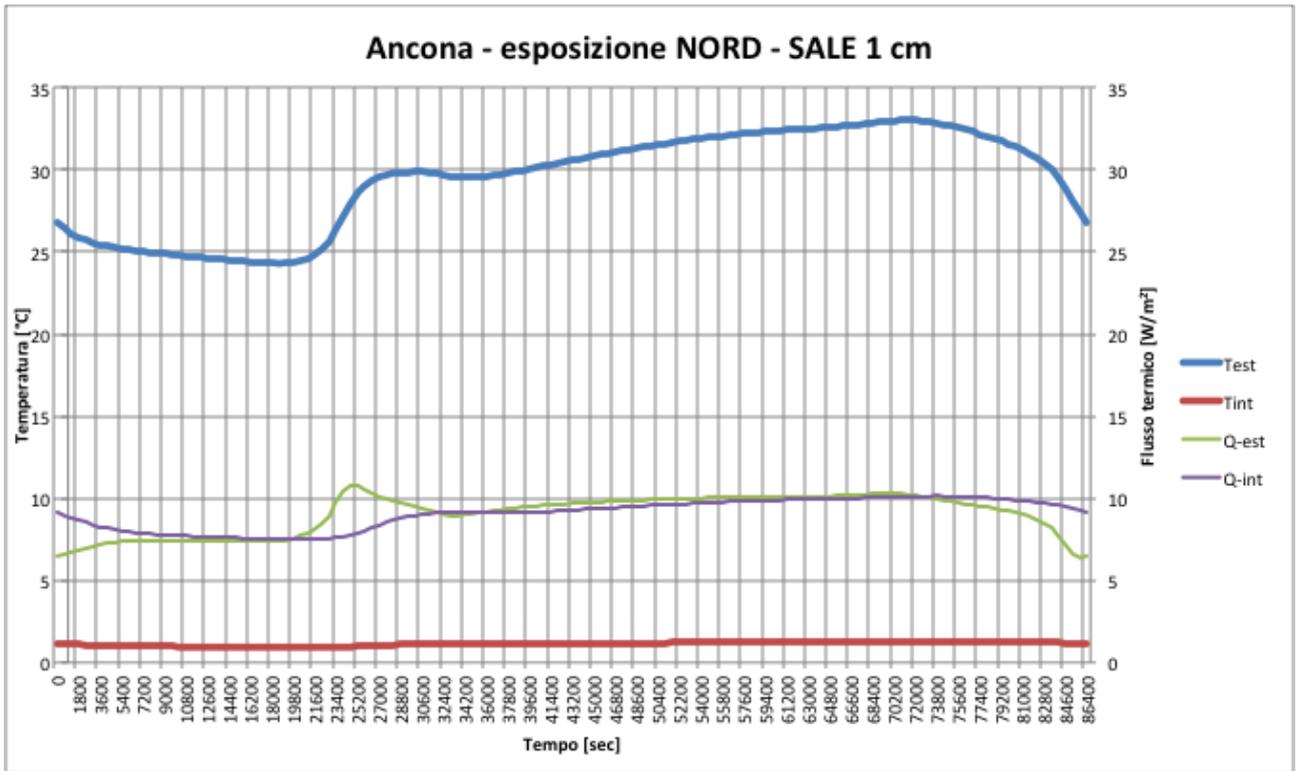




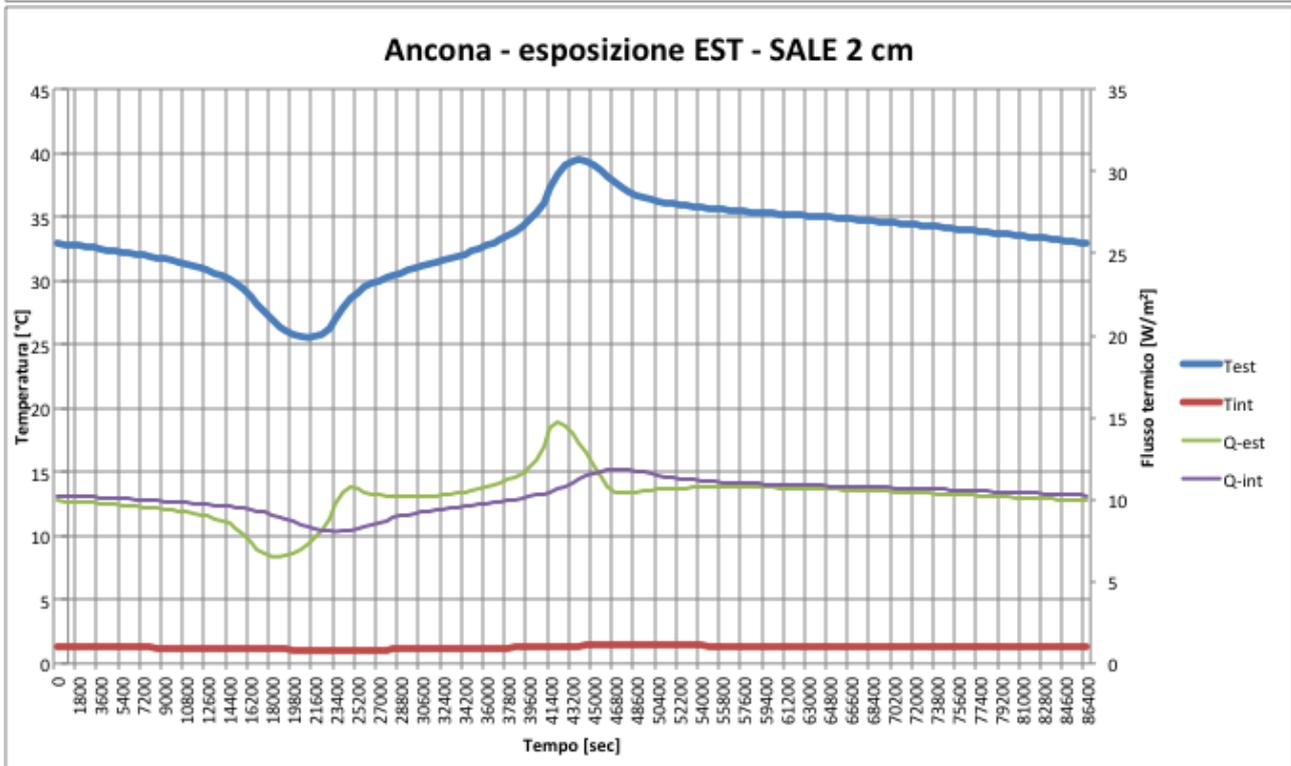
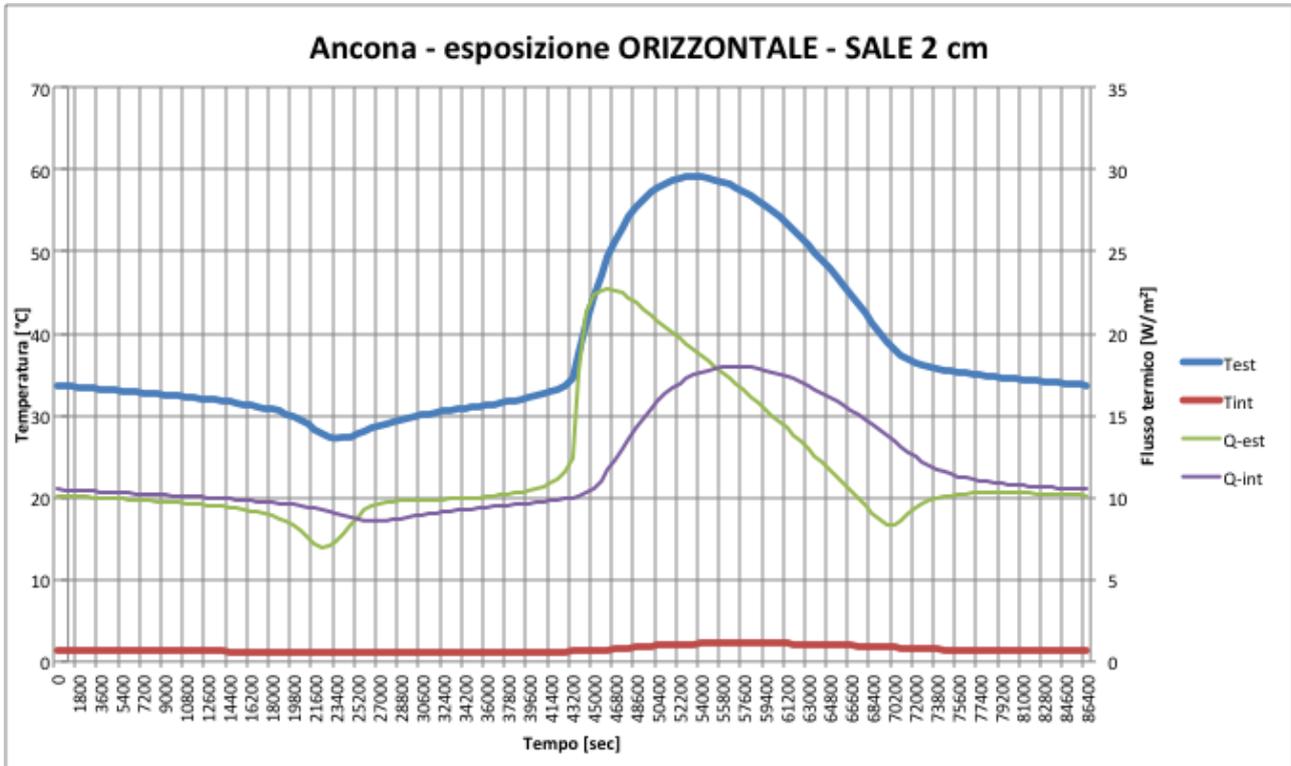
MODELLO: SALE C32 -1 cm

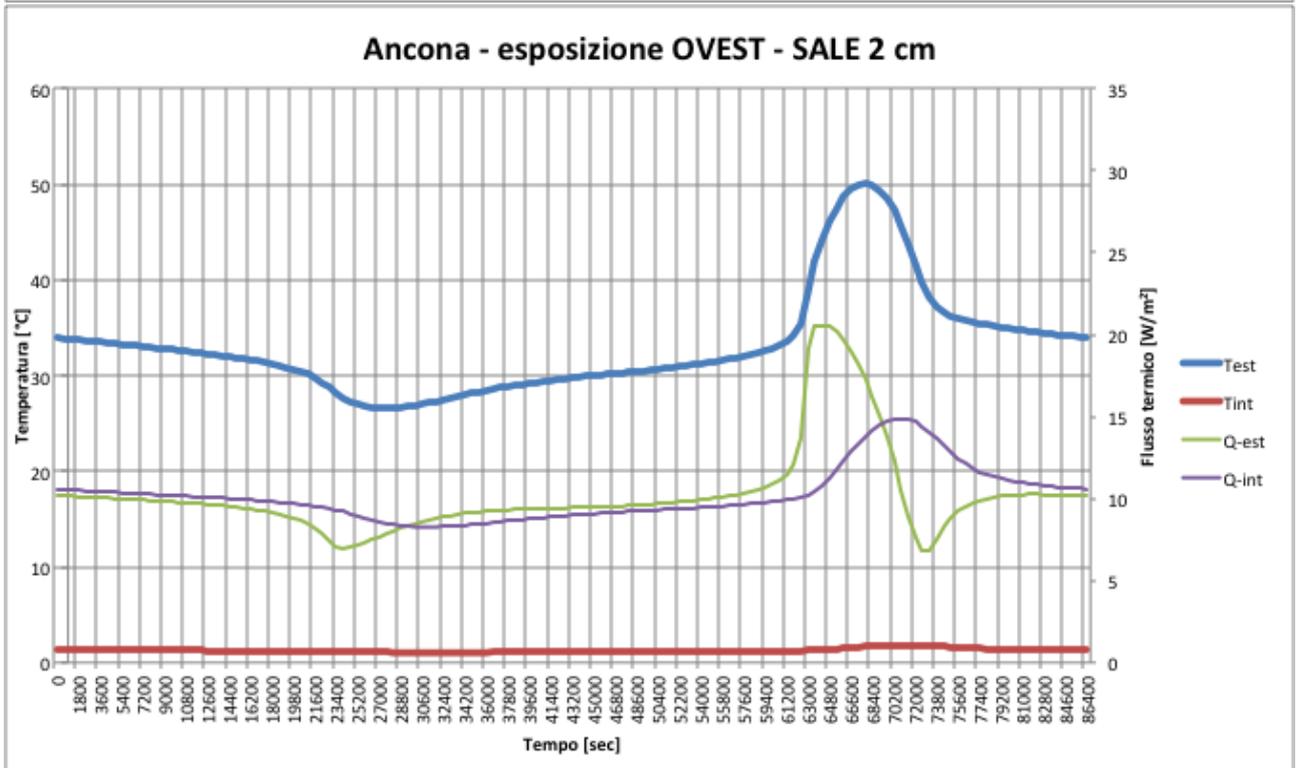
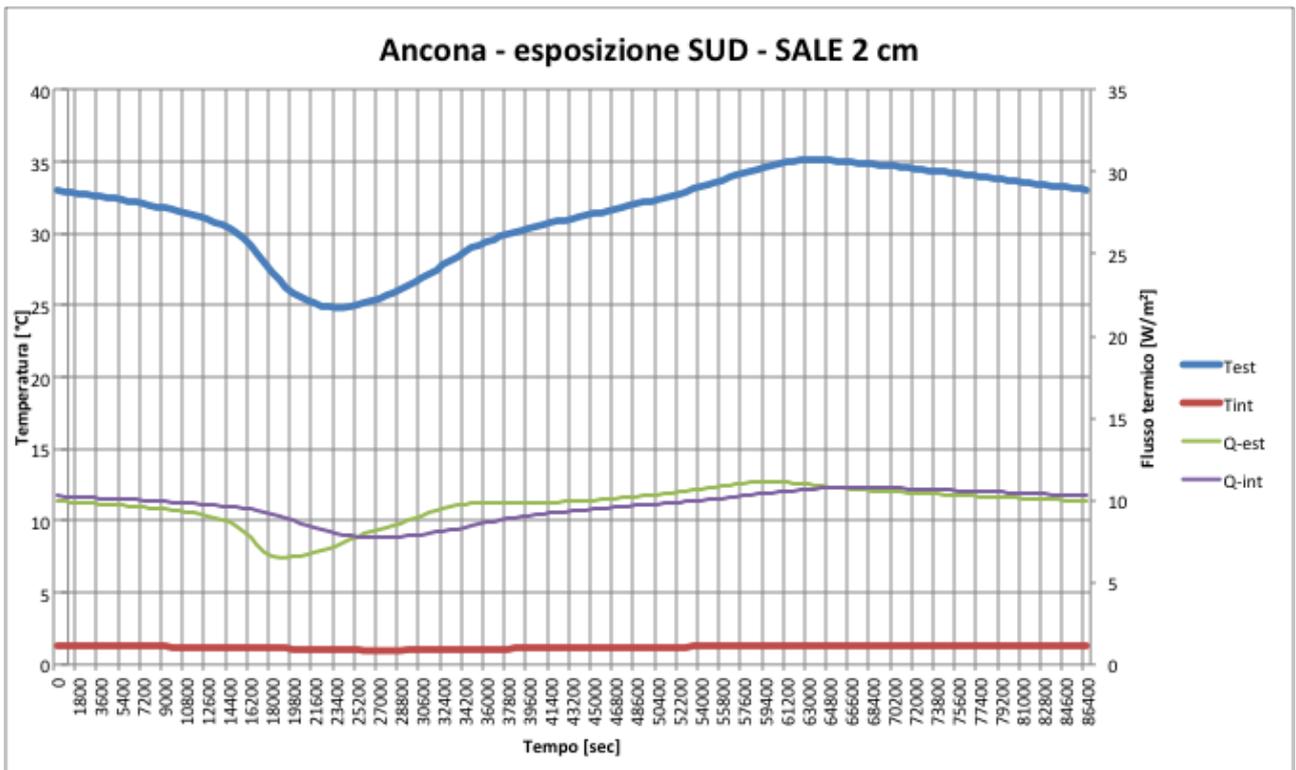


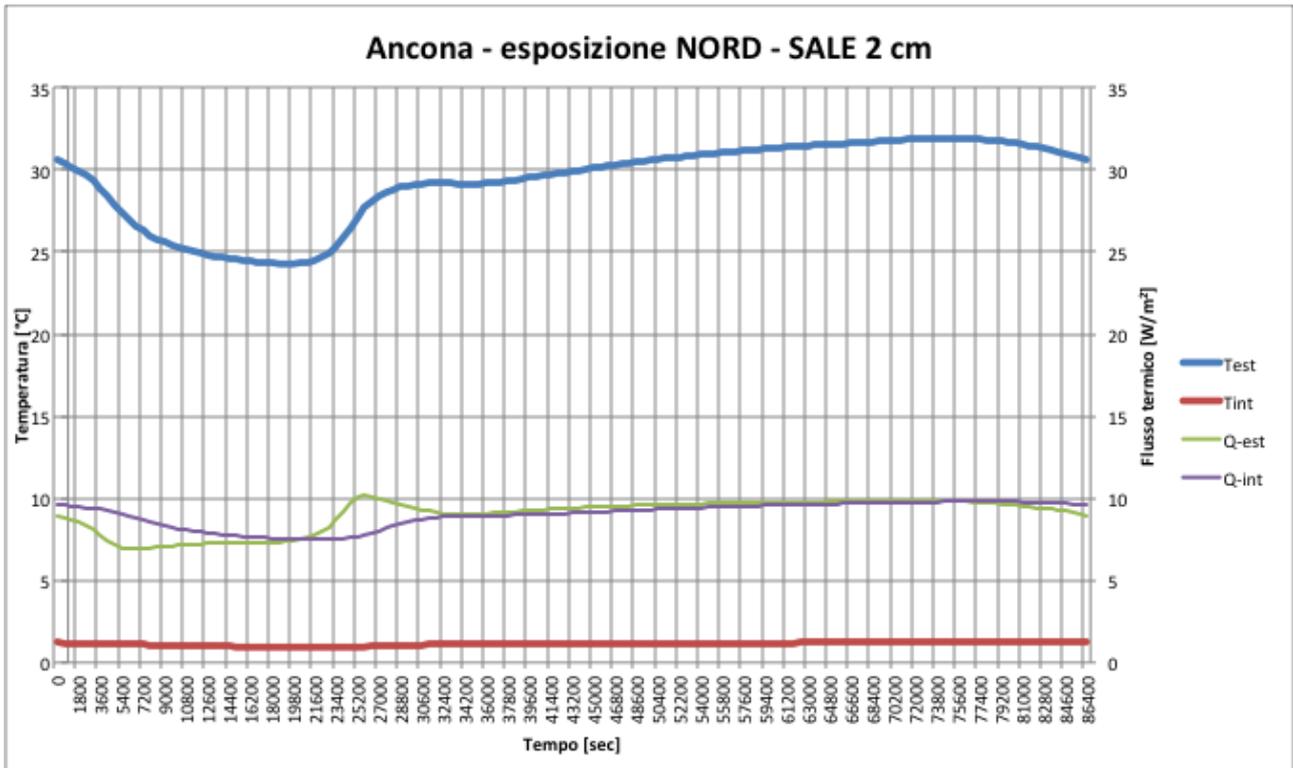




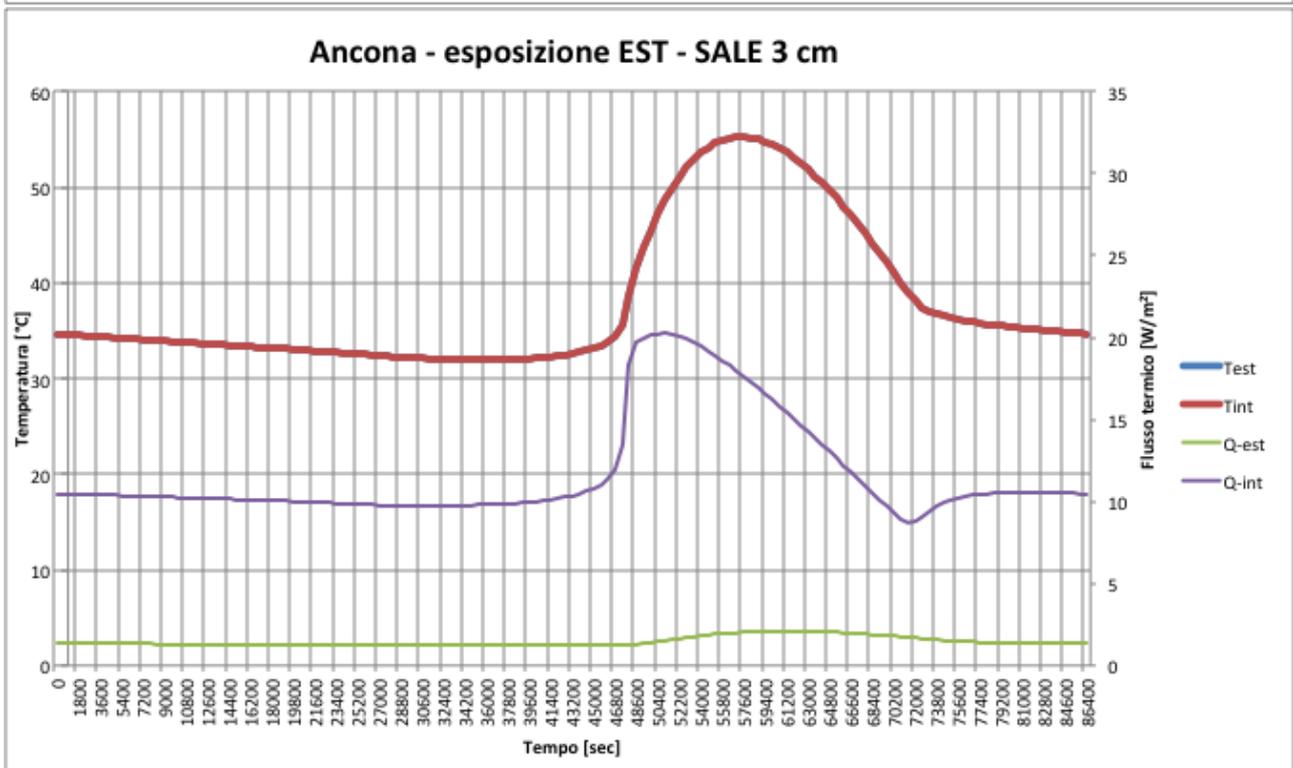
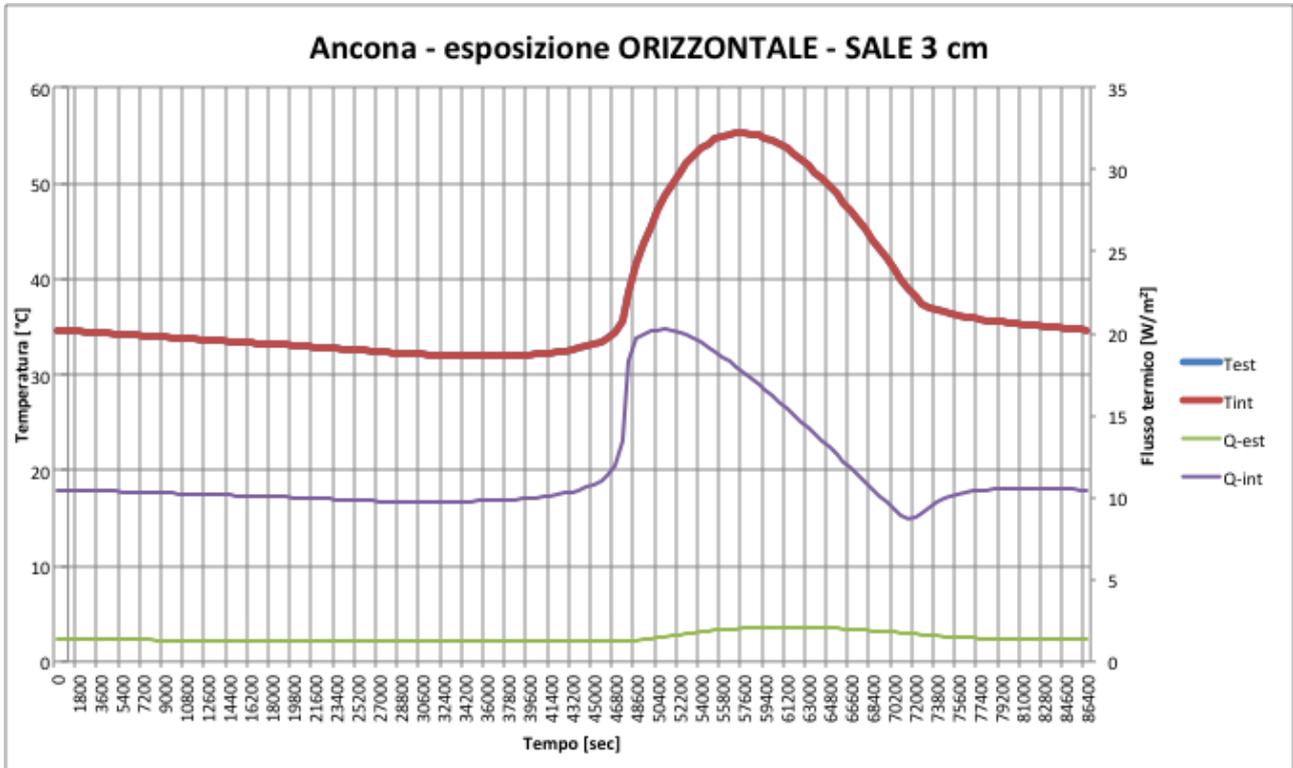
MODELLO: sale C32 – 2 cm

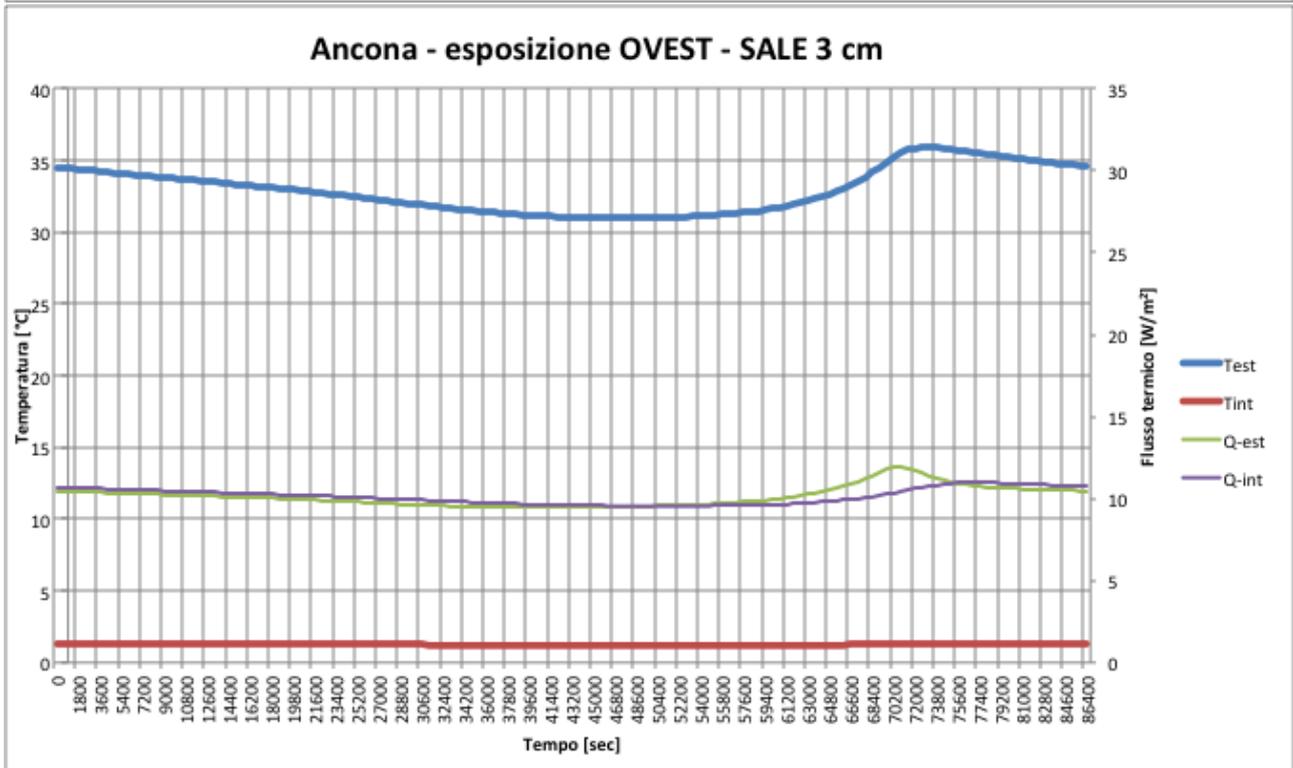
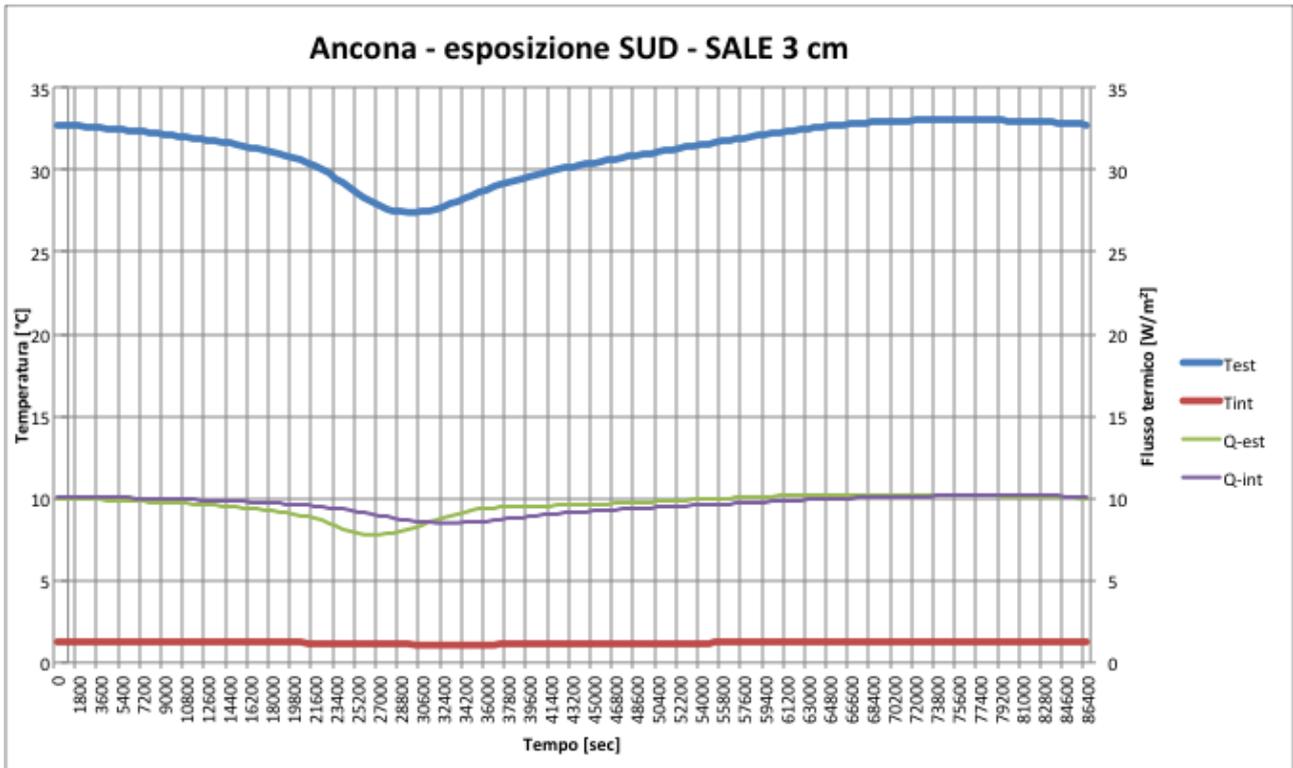


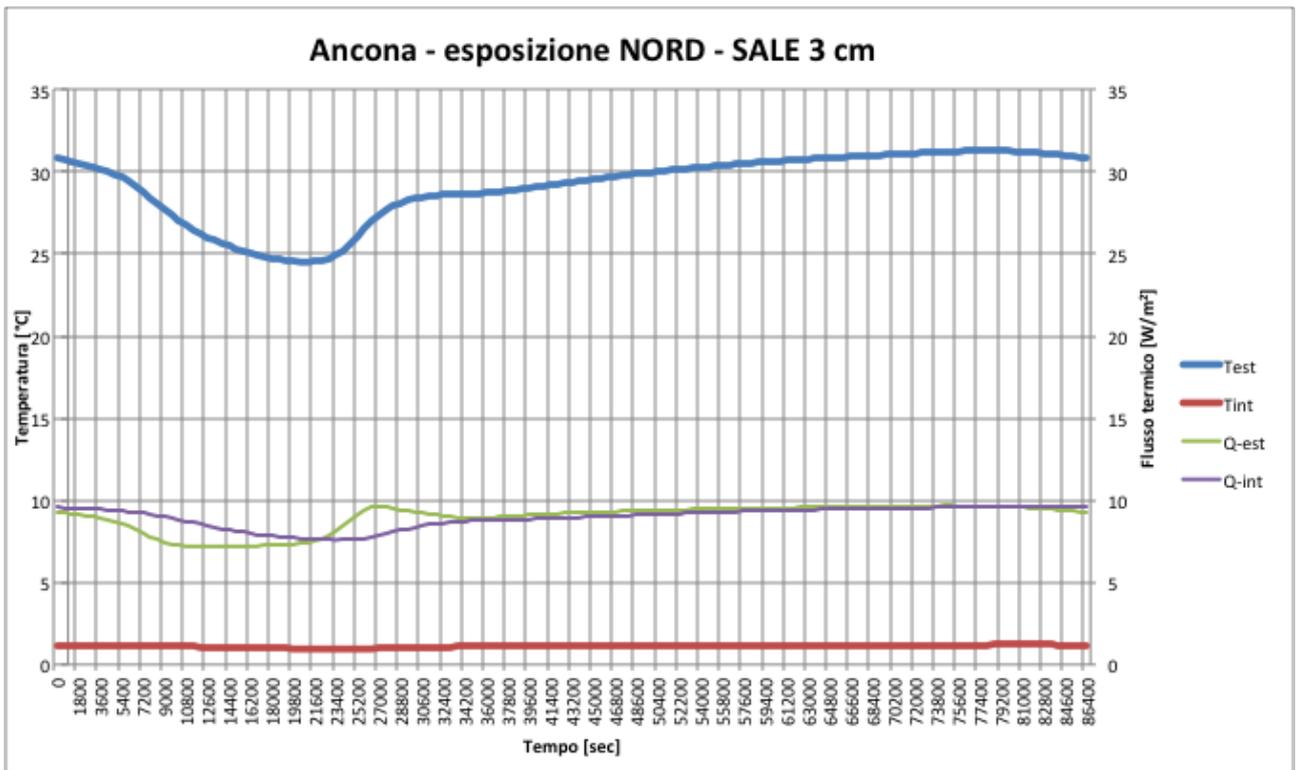




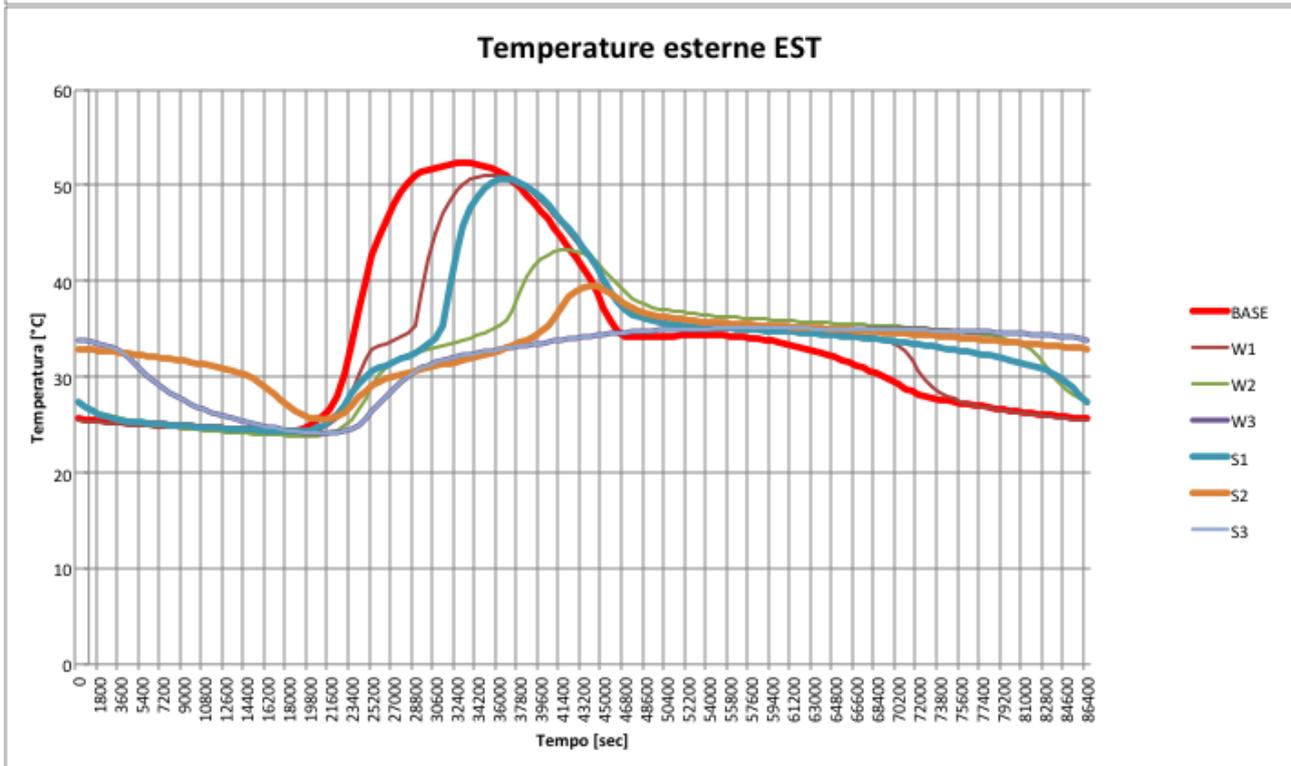
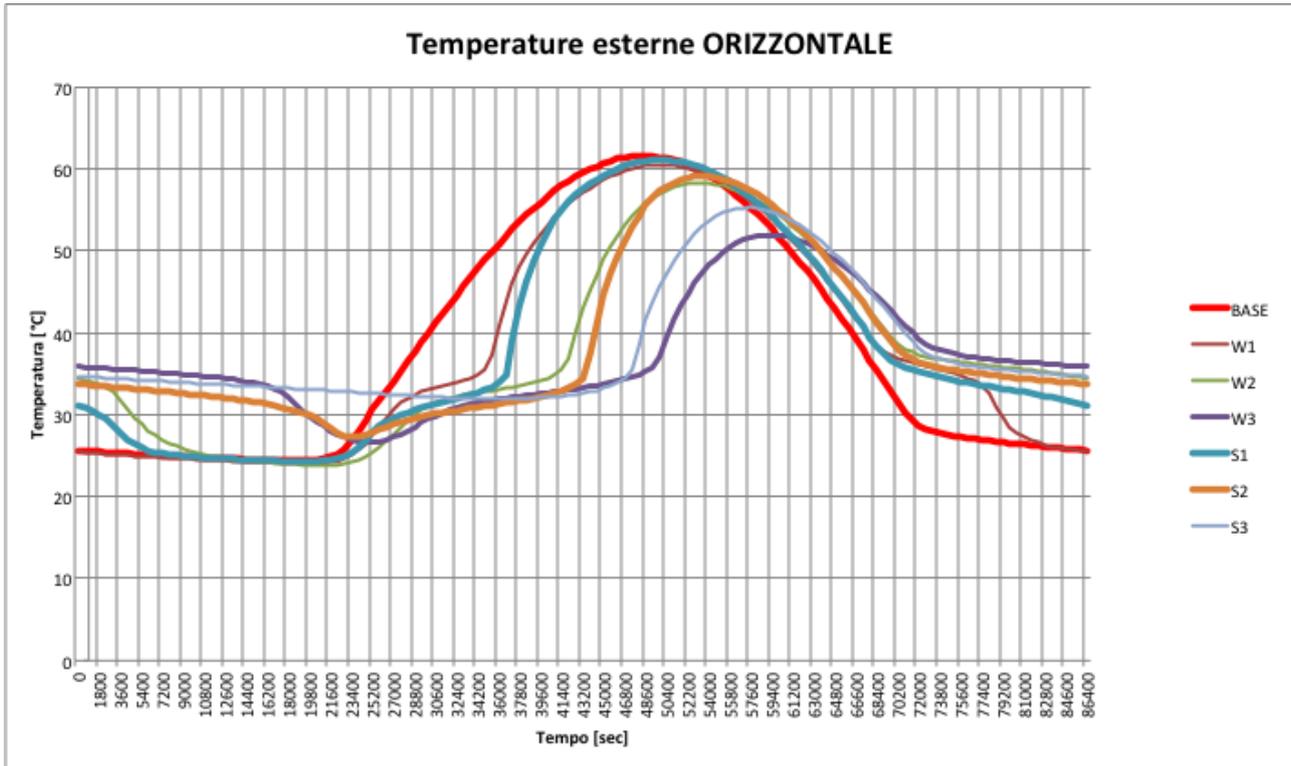
MODELLO: sale C32 – 3cm

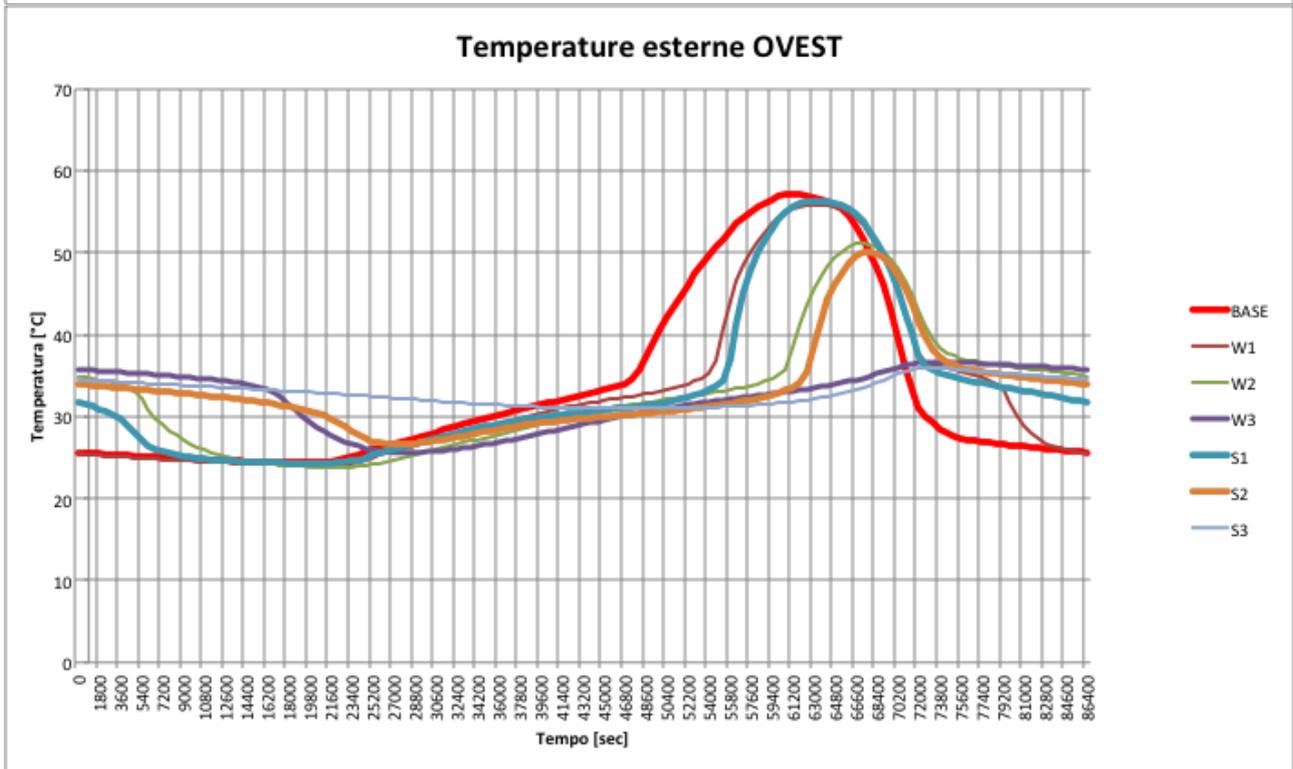
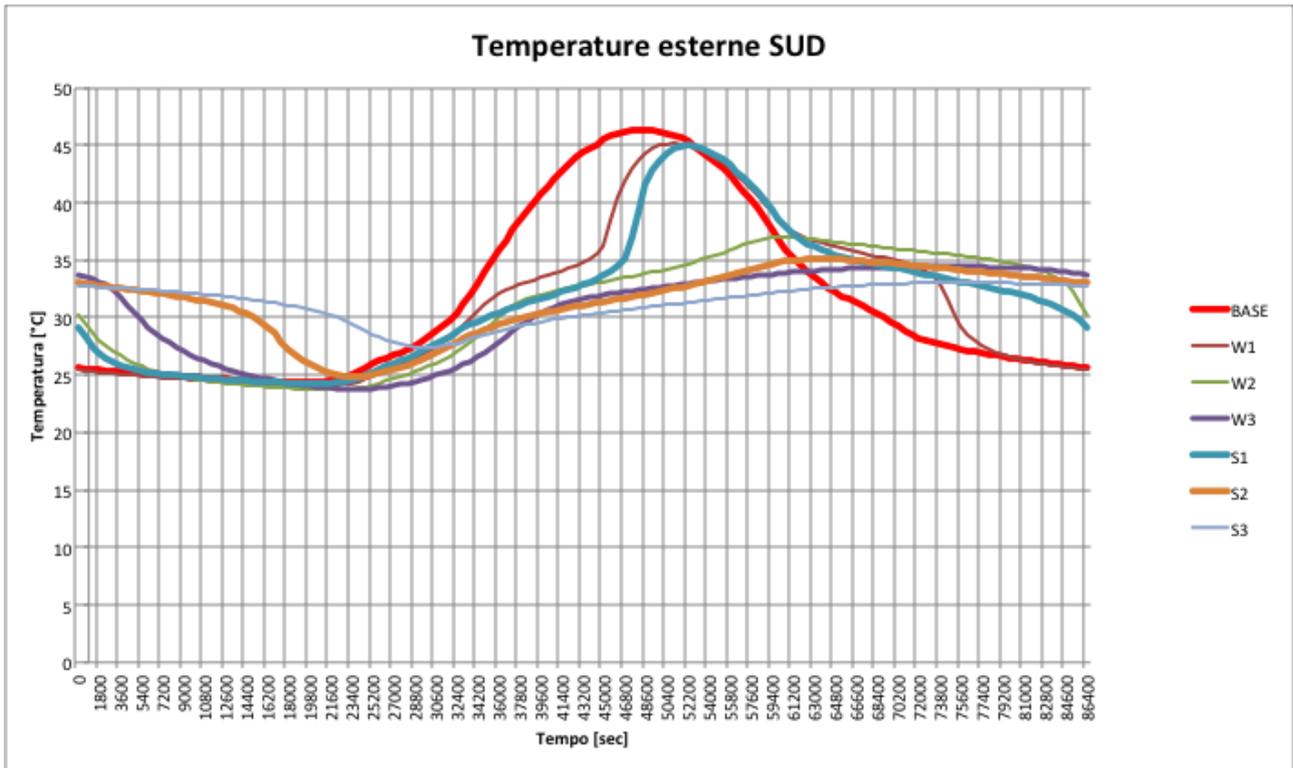


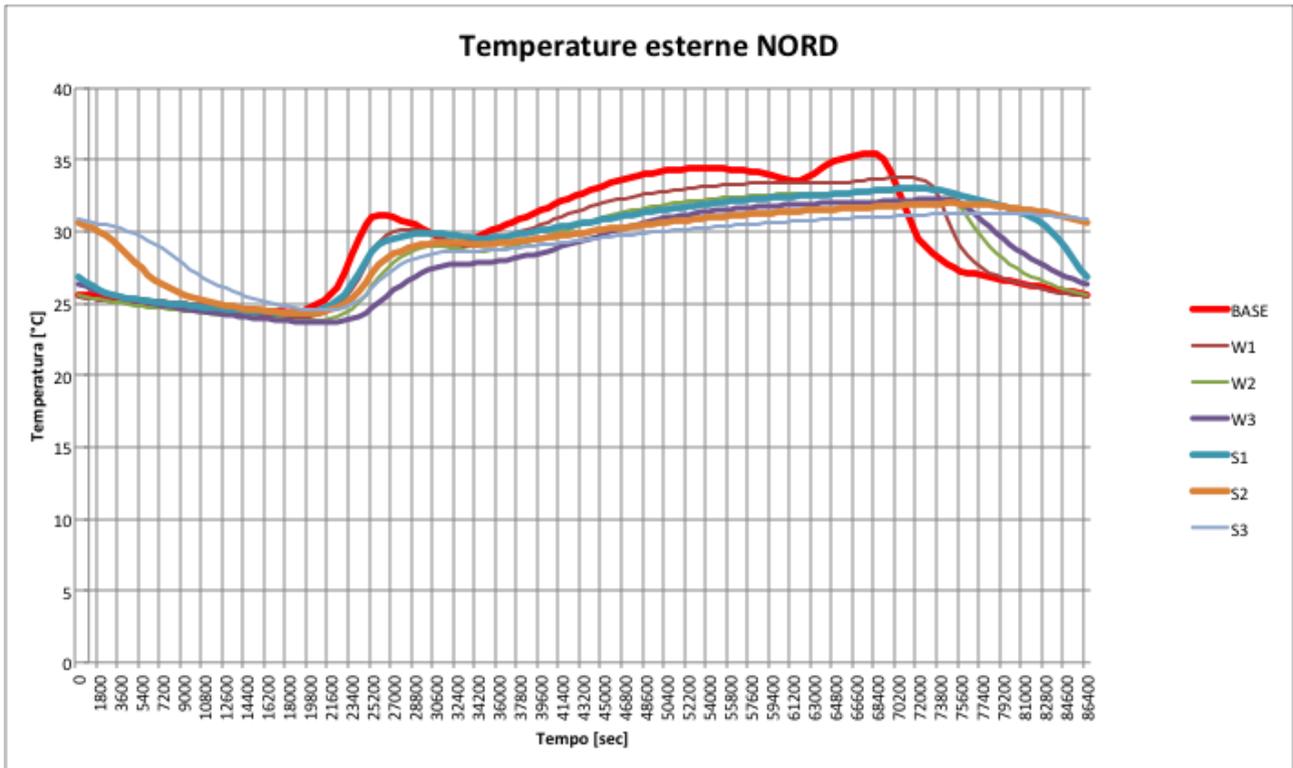




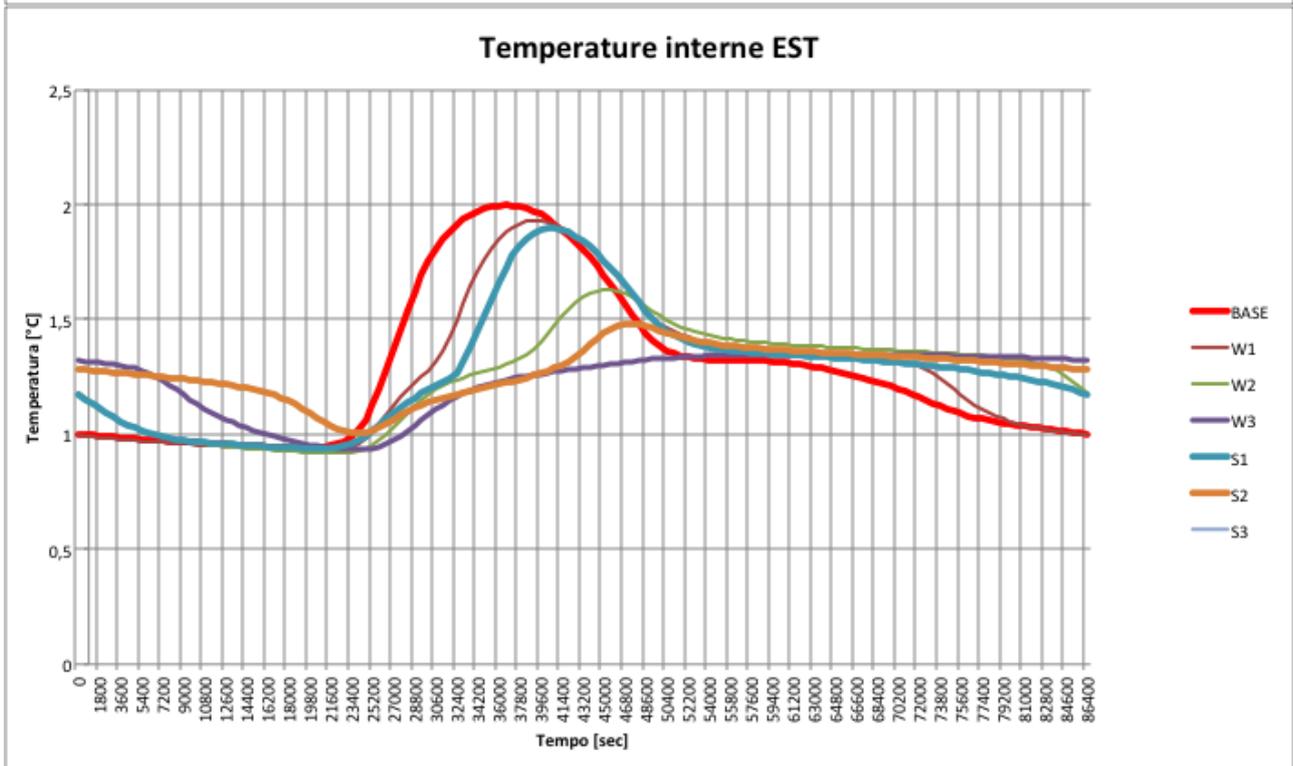
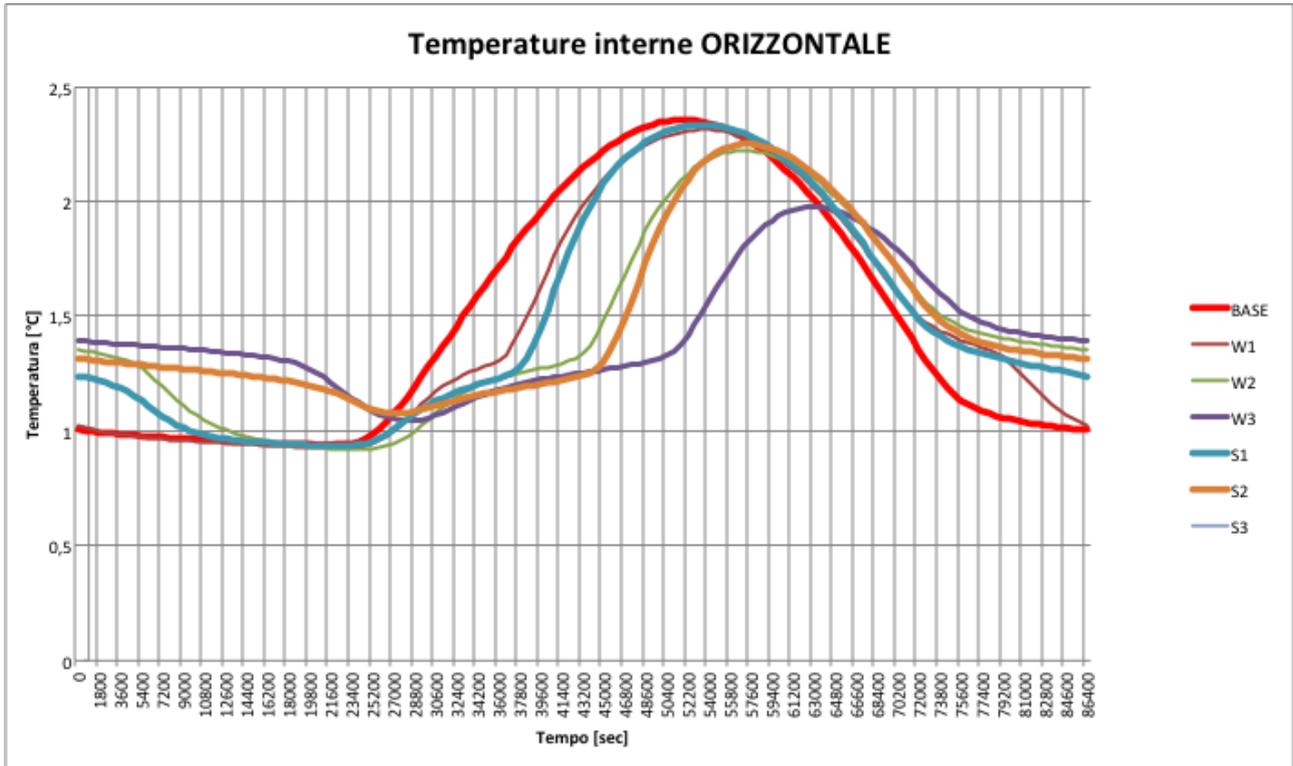
CONFRONTI: TEMPERATURA SUPERFICIE ESTERNA SANDWICH

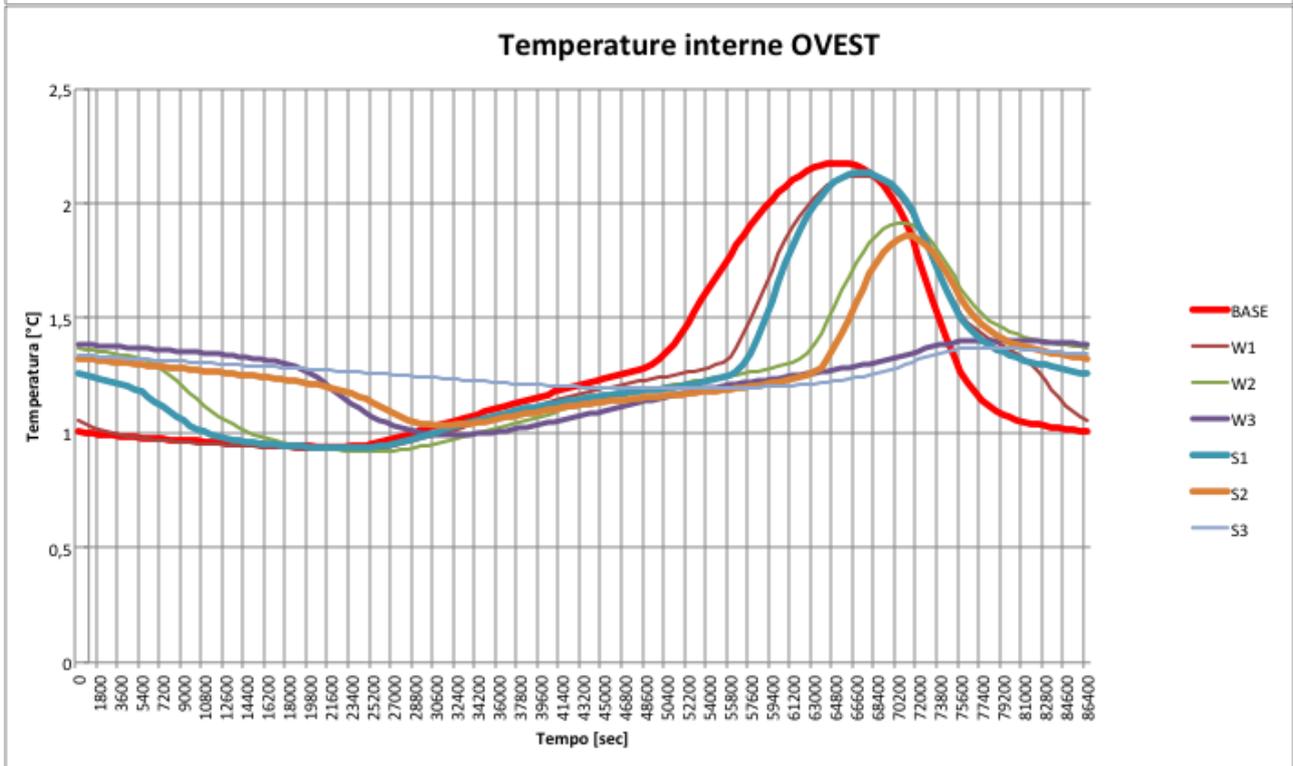
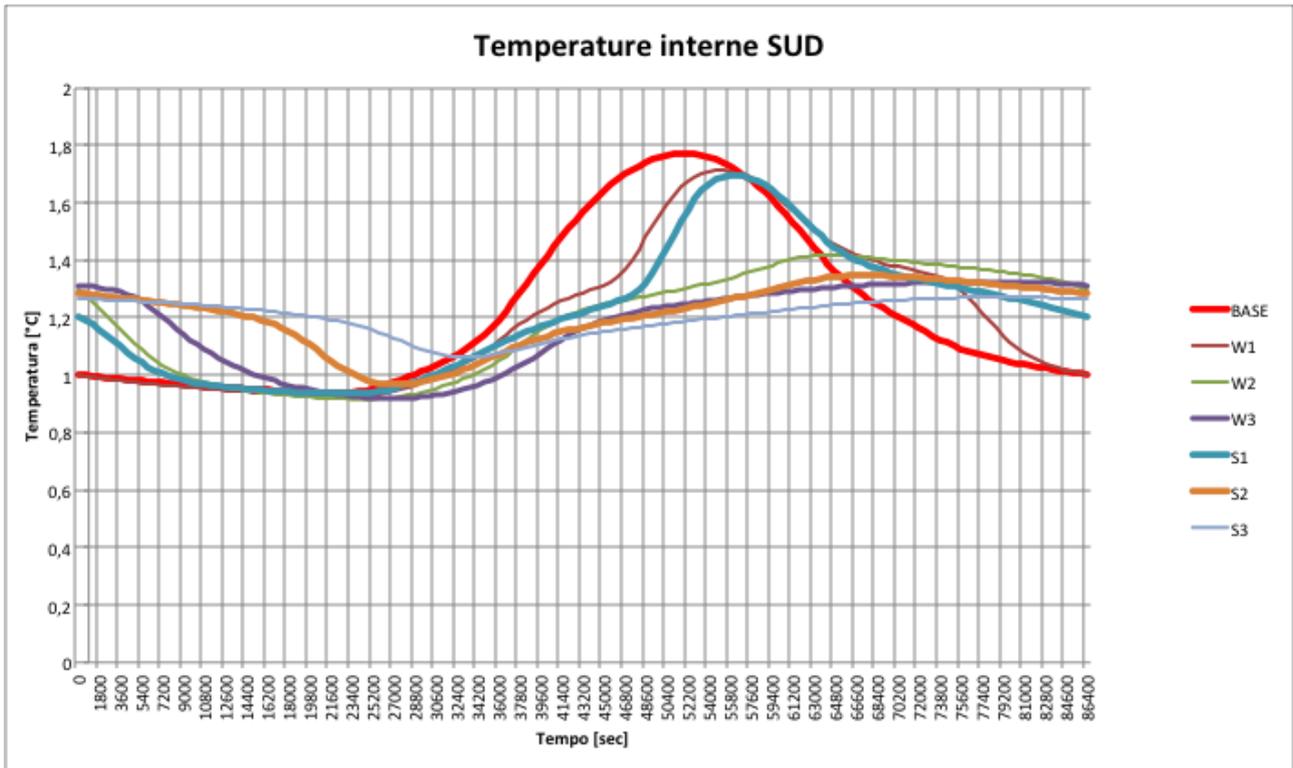


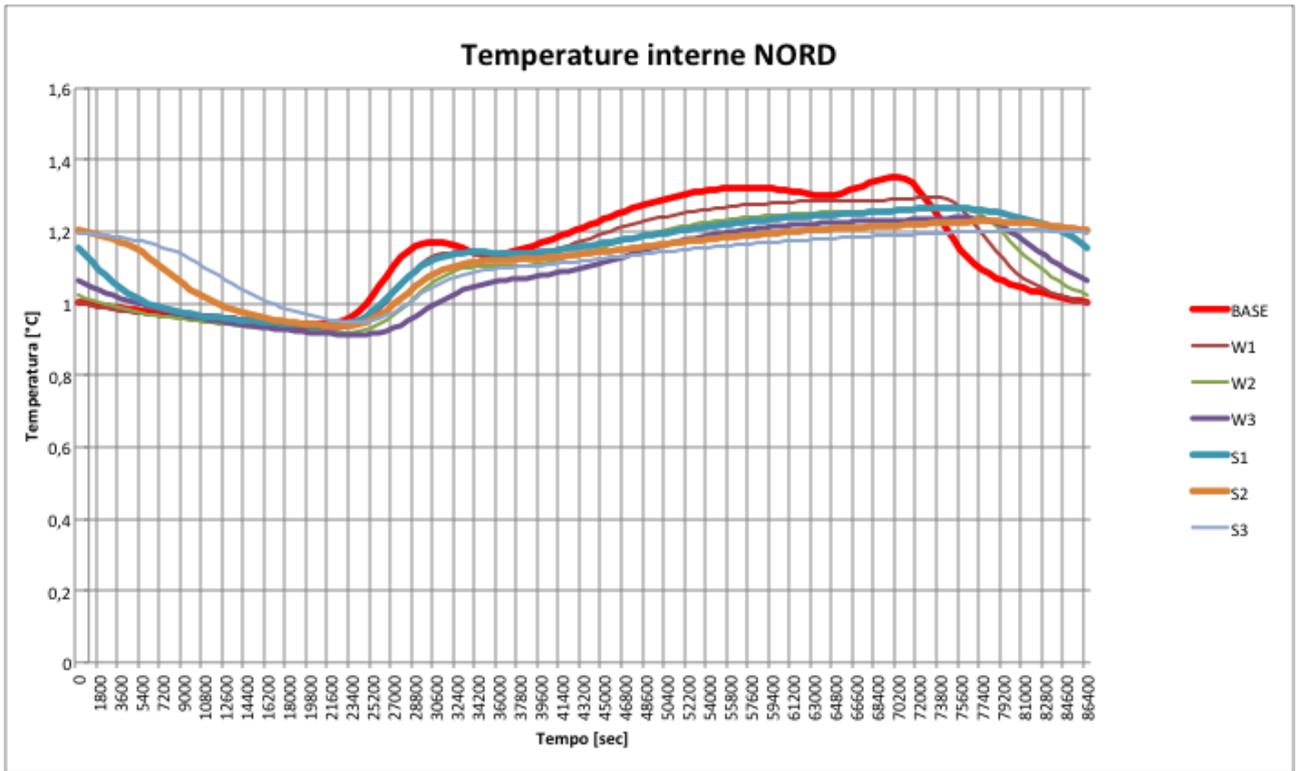




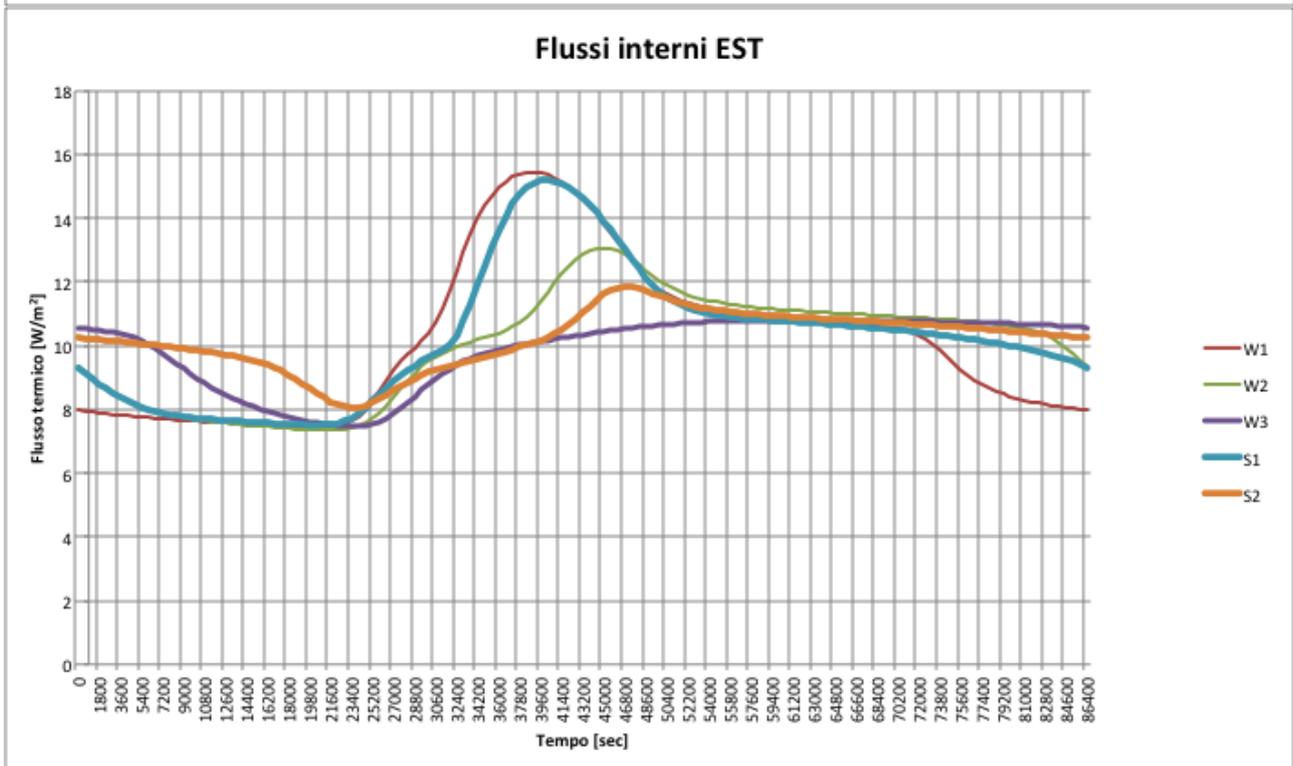
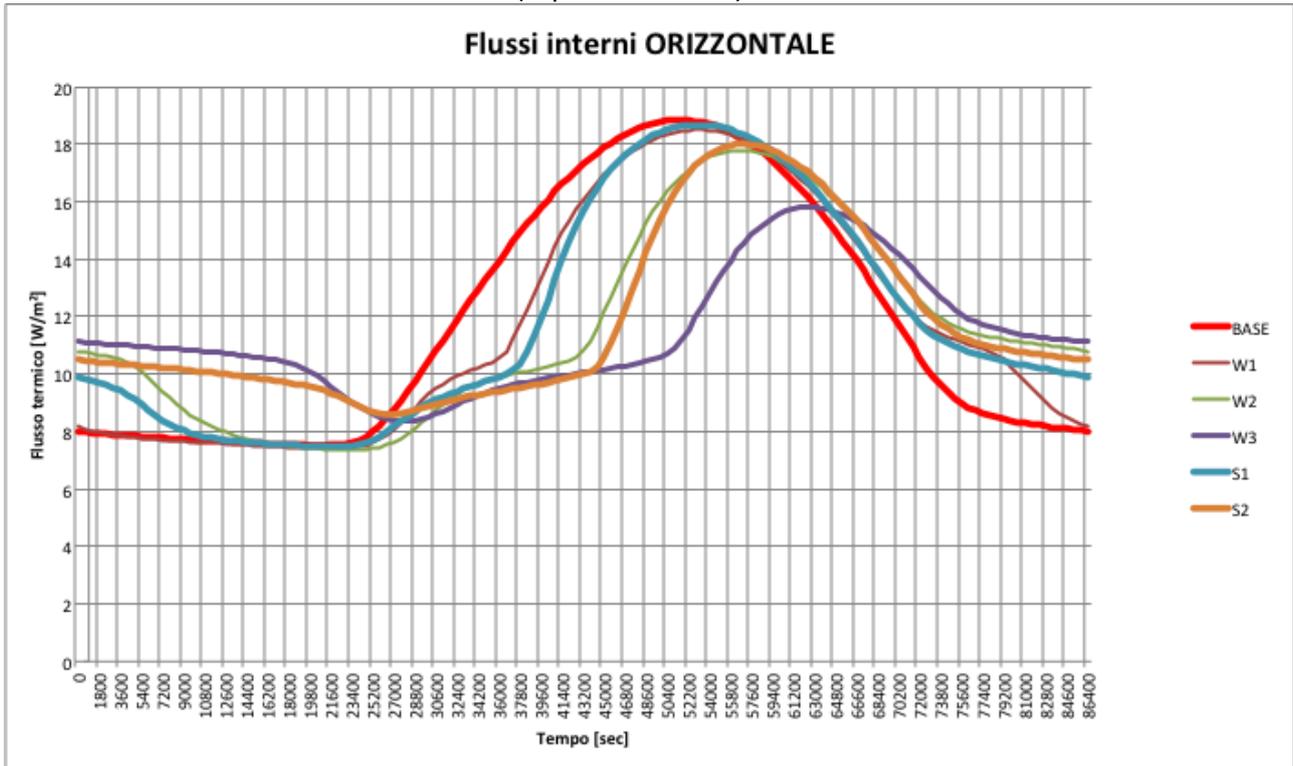
CONFRONTI: TEMPERATURA SUPERFICIE INTERNA

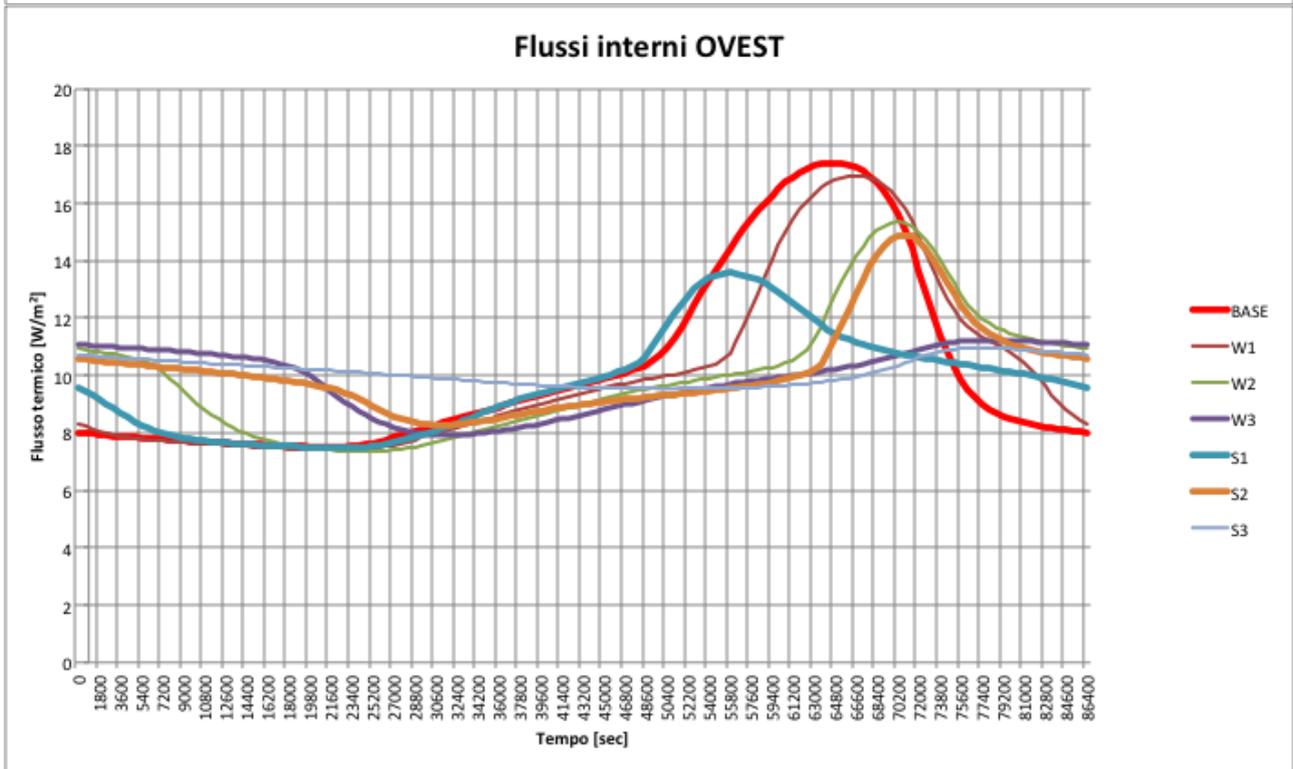
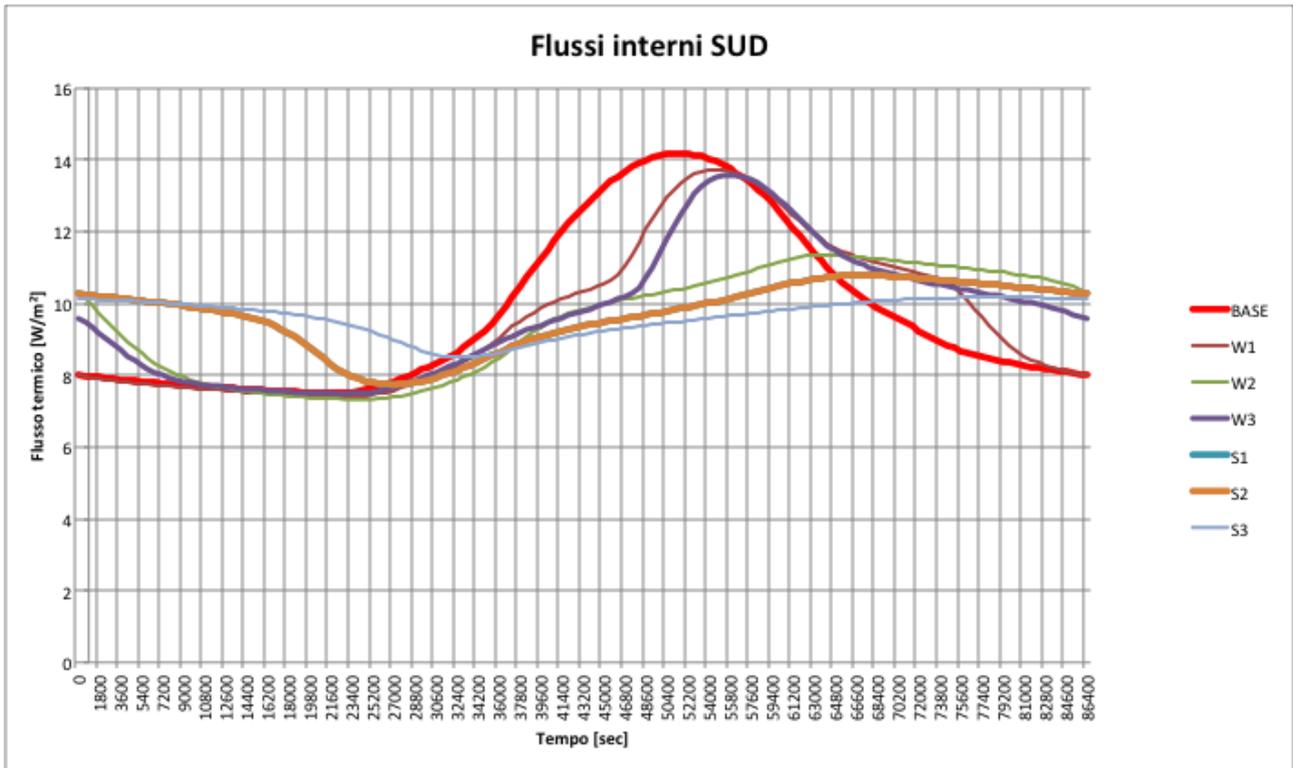


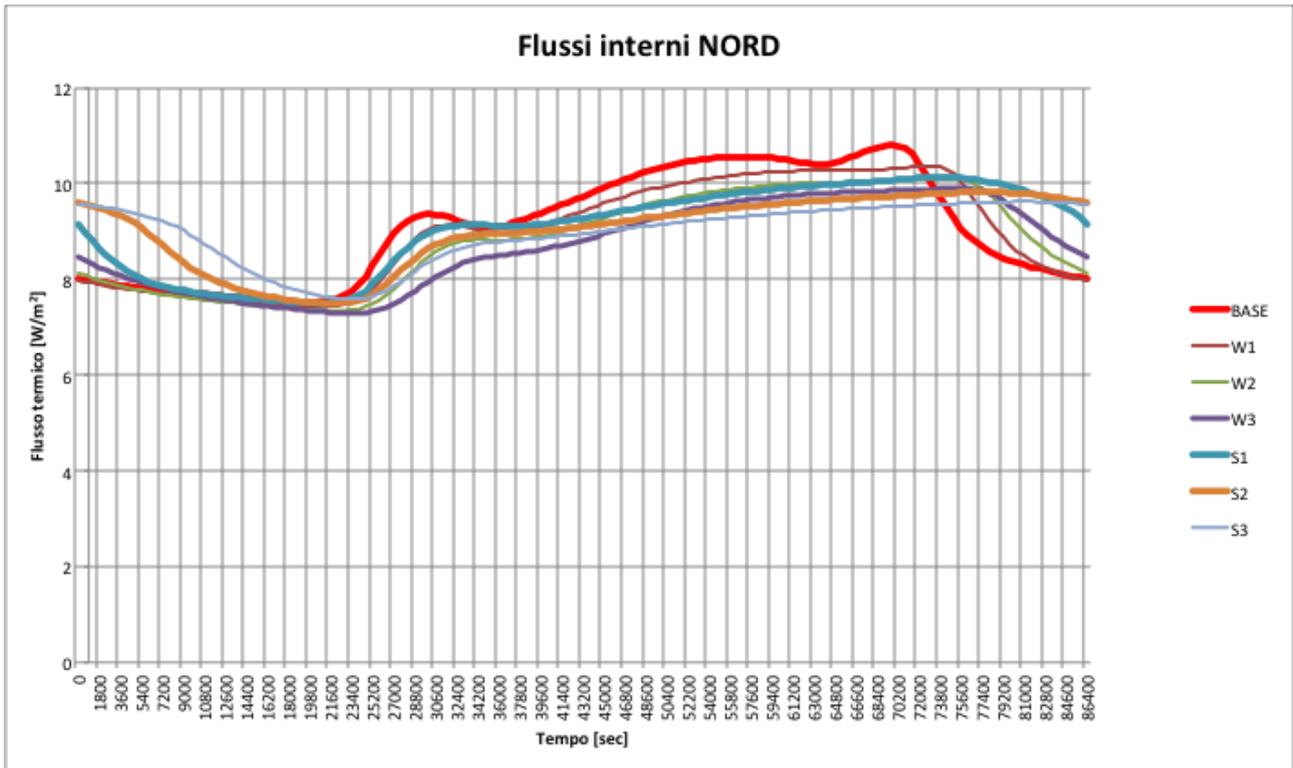




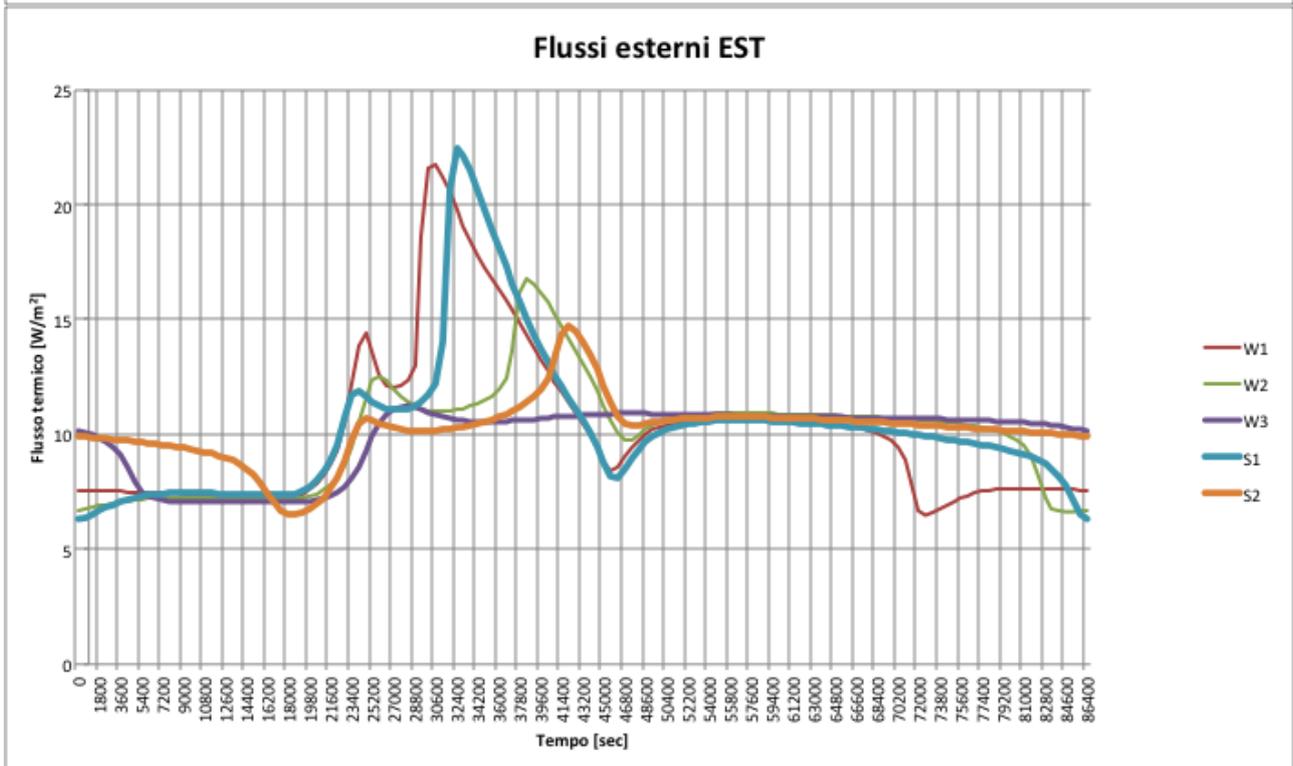
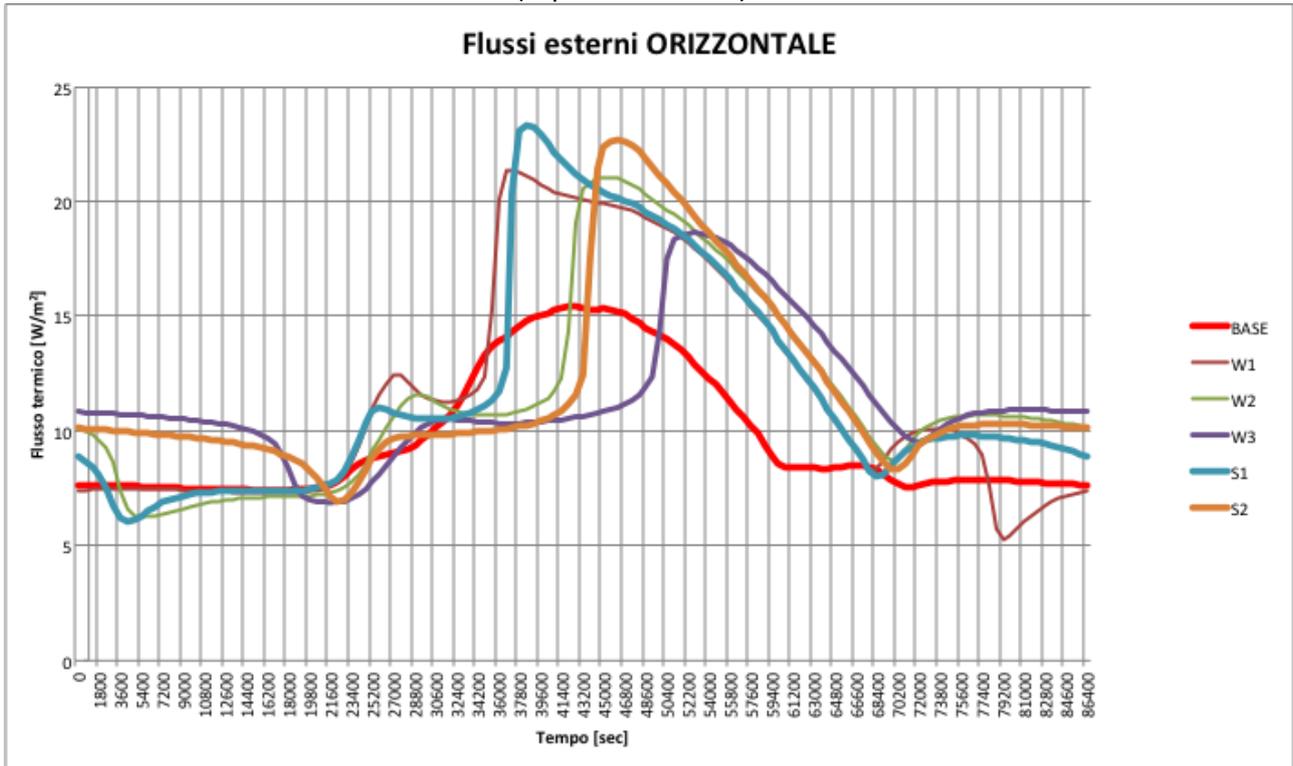
CONFRONTI: FLUSSO TERMICO ENTRANTE (superficie interna)

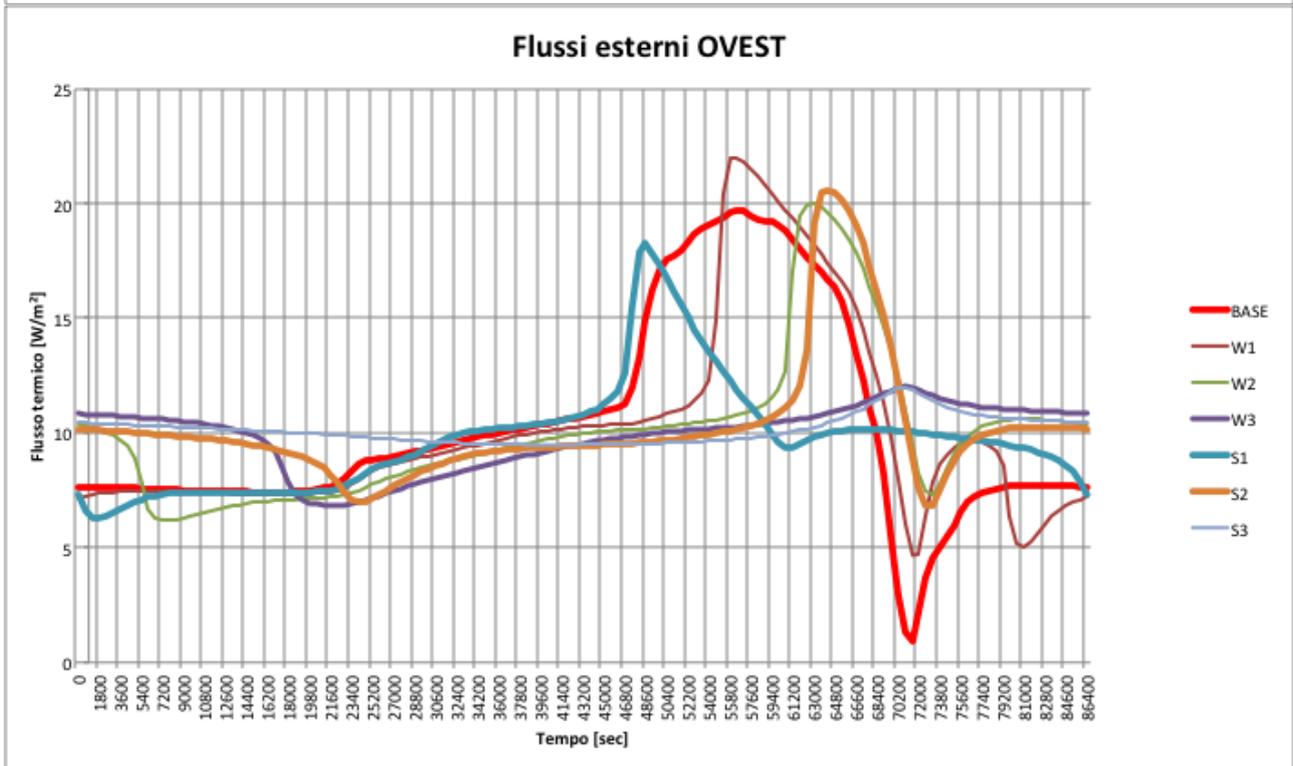
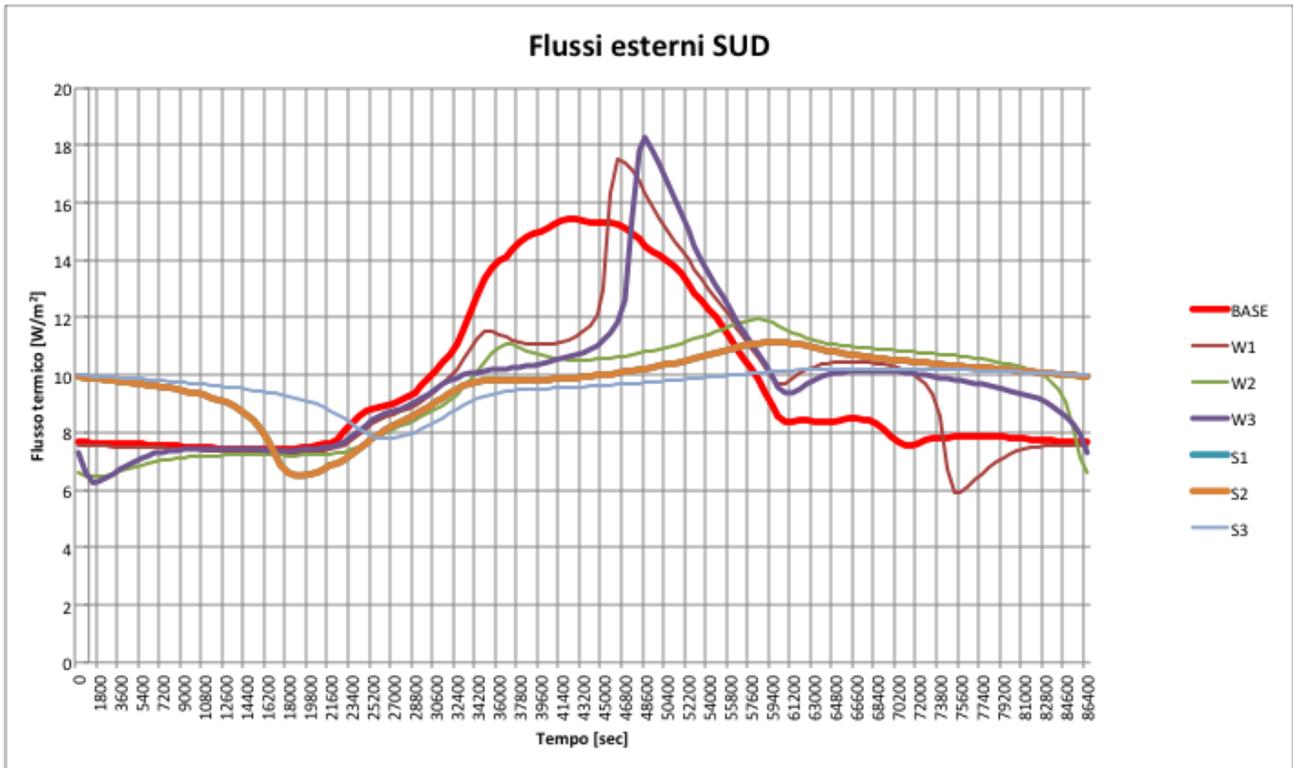


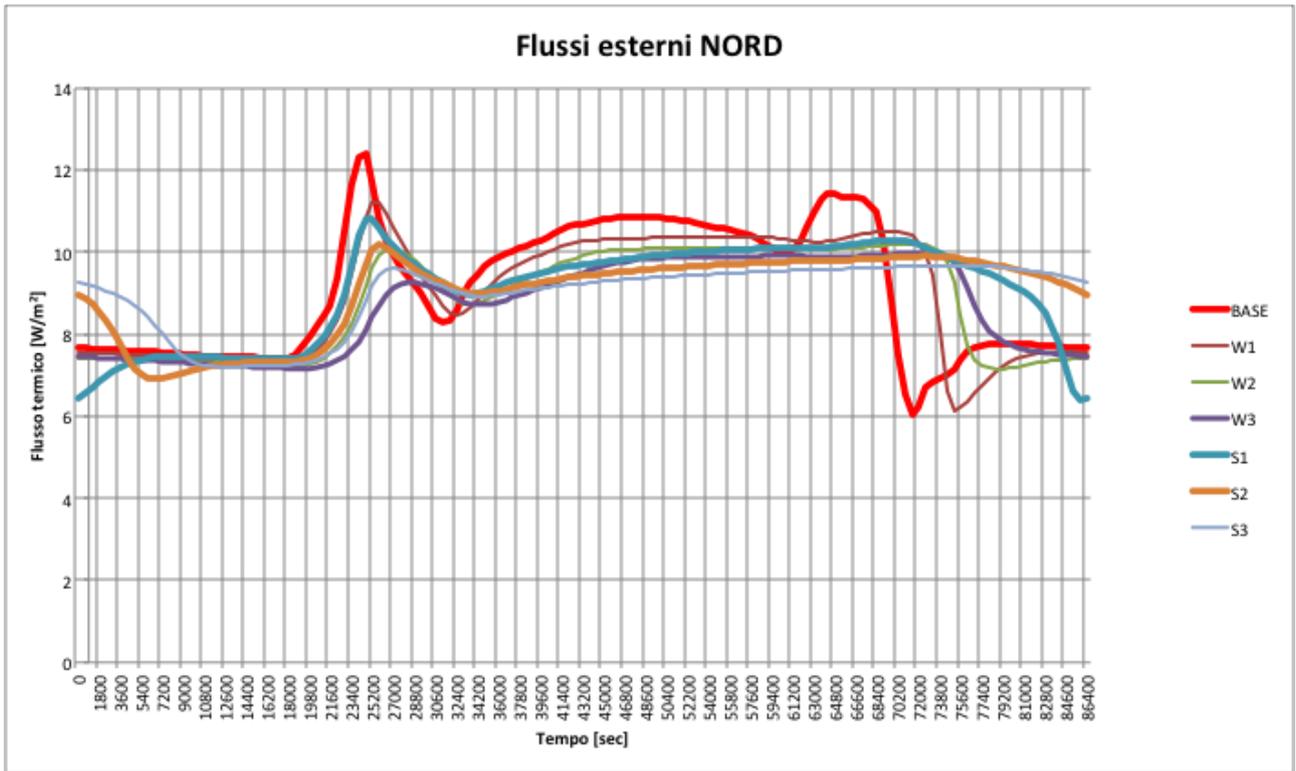




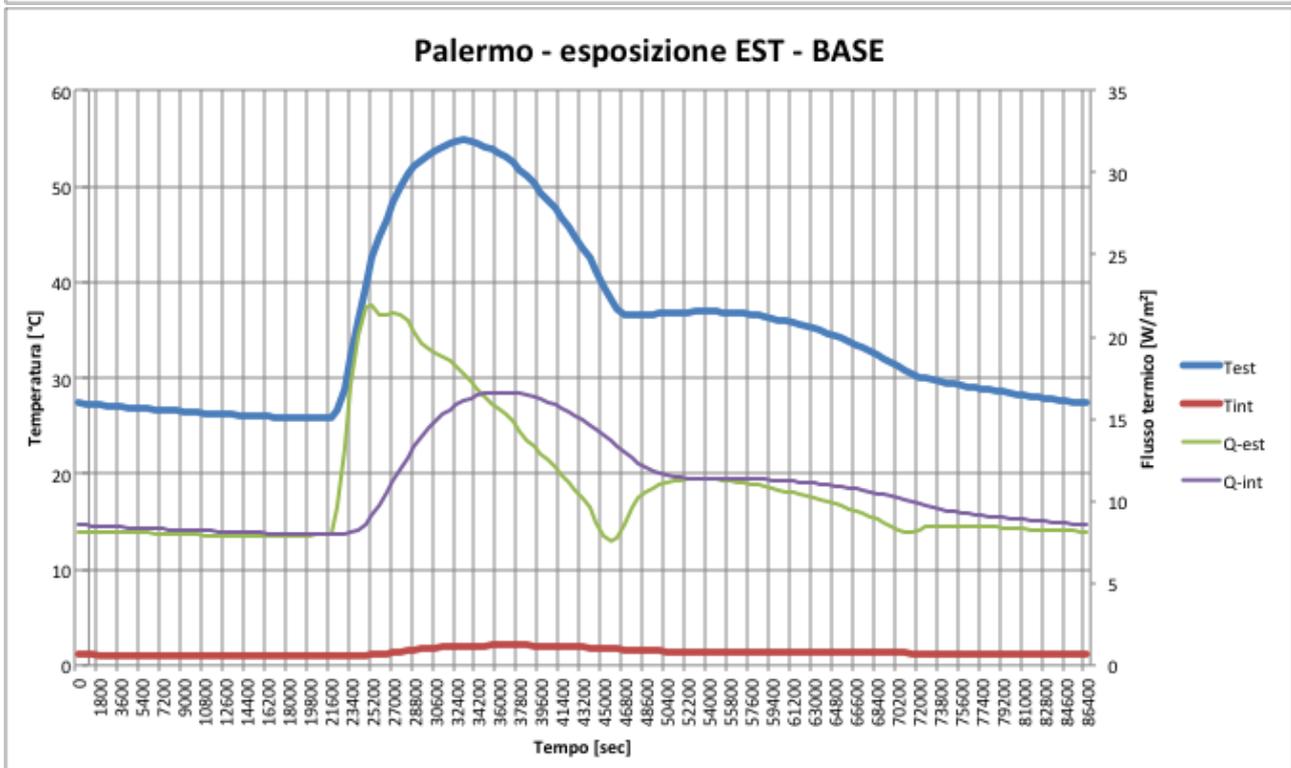
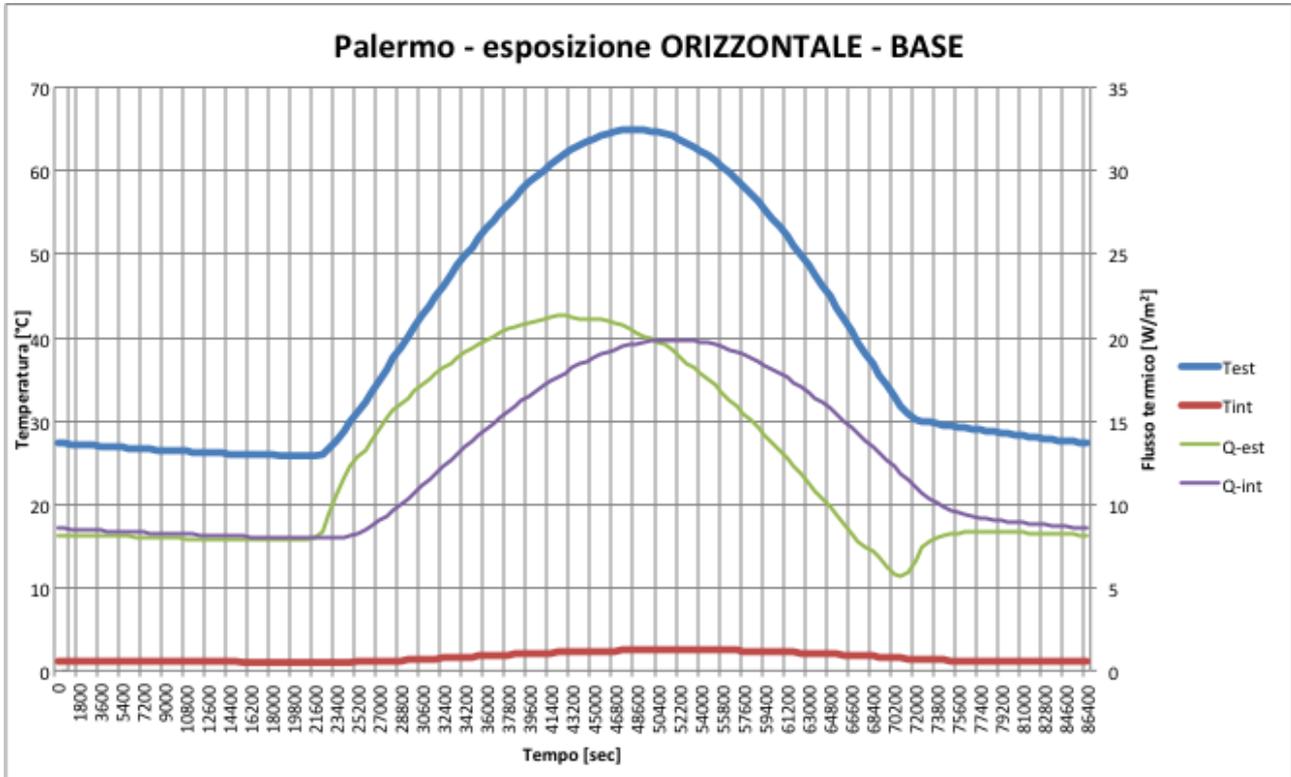
CONFRONTI: FLUSSO TERMICO ENTRANTE (superficie esterna)

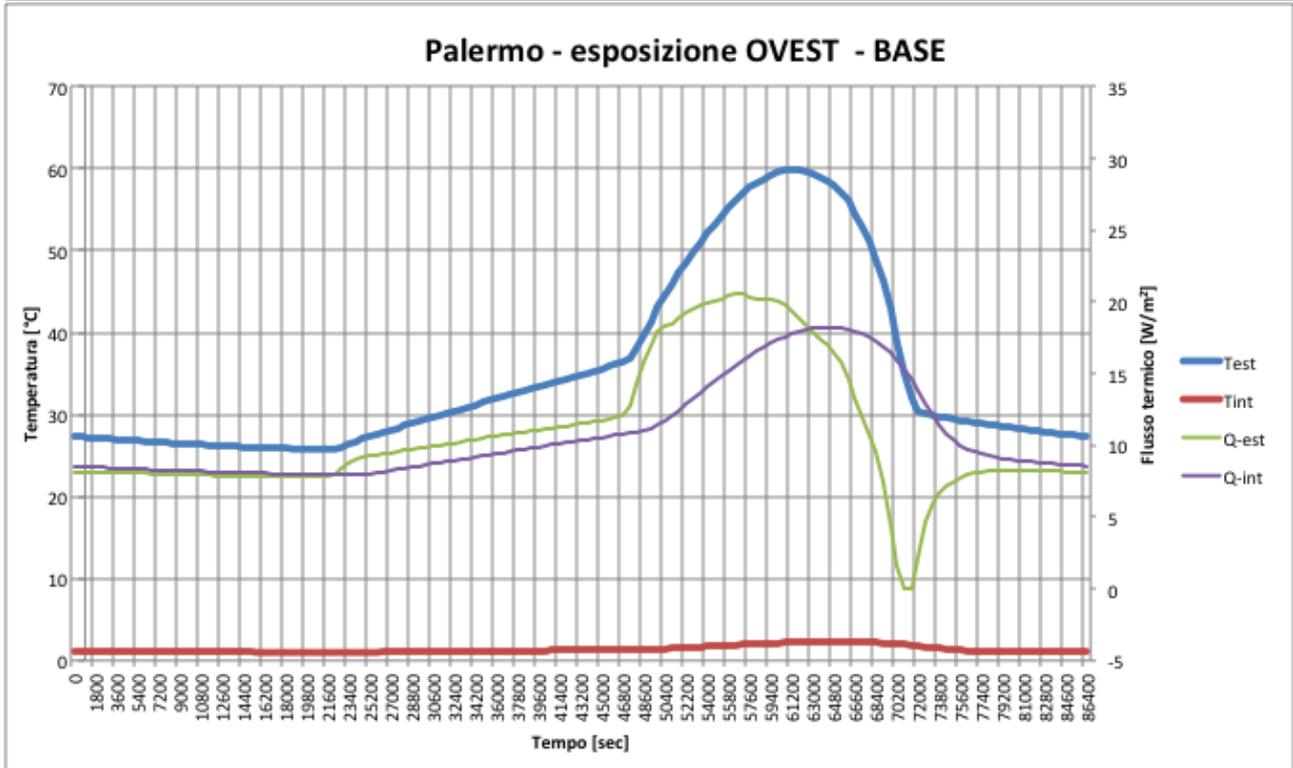
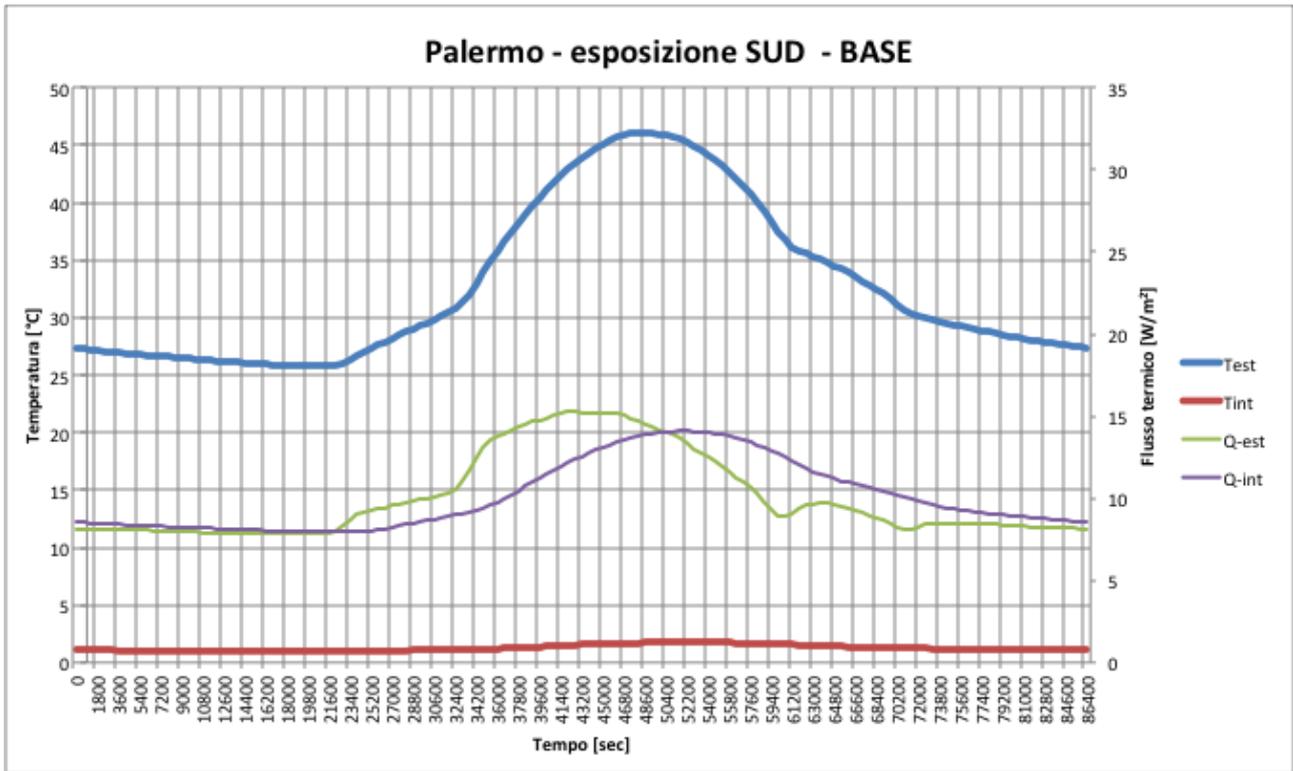


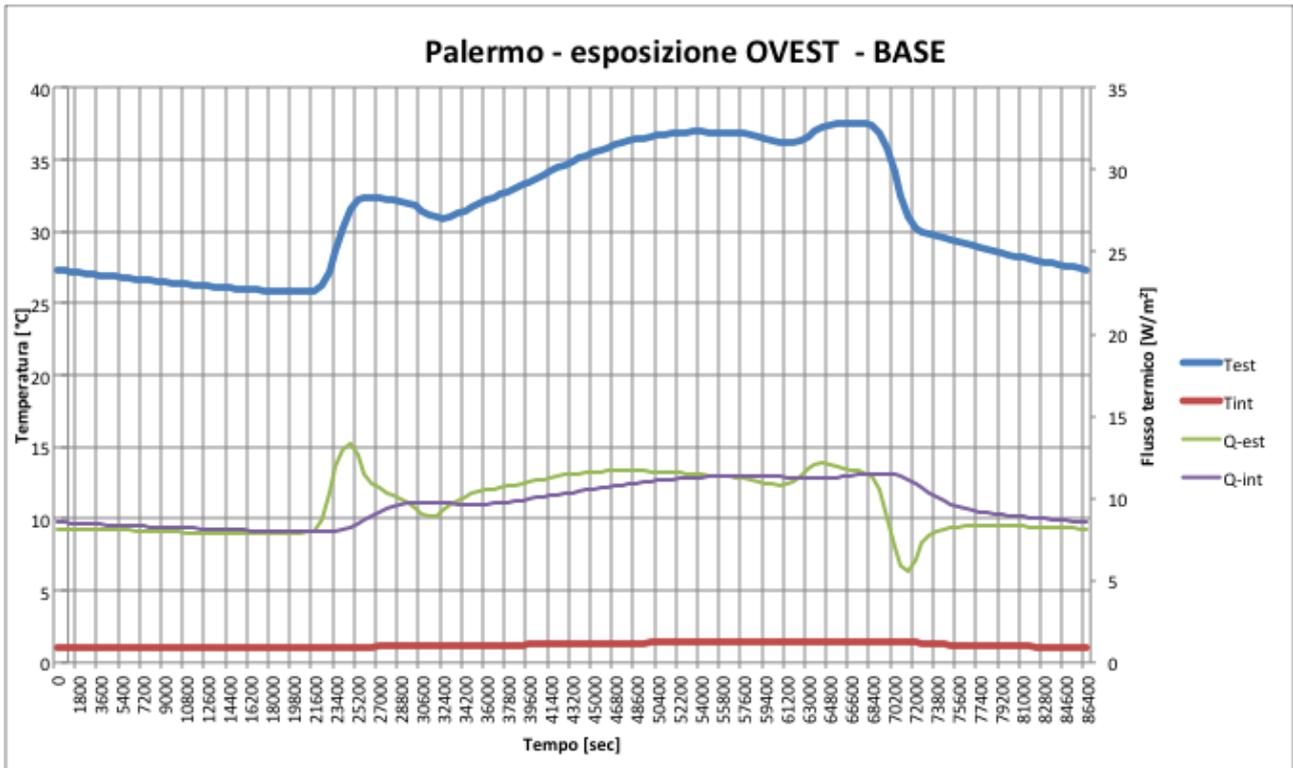




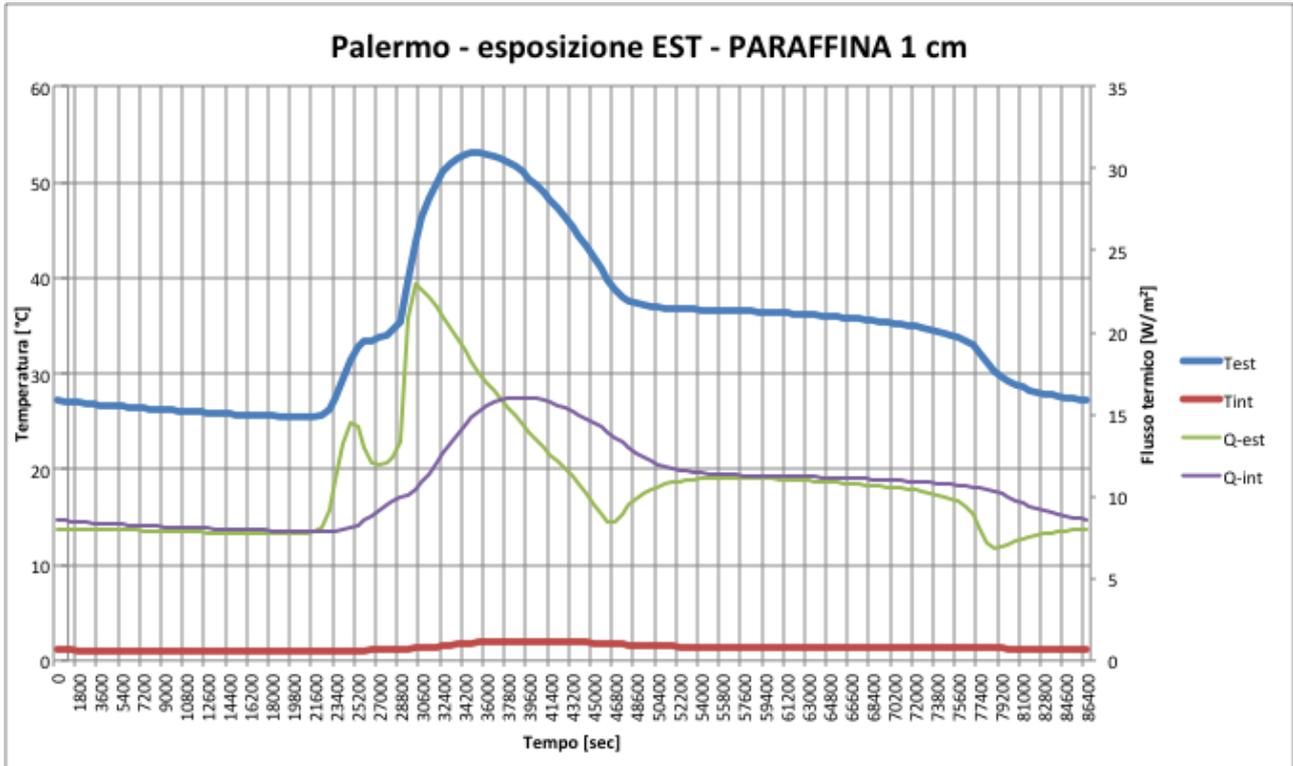
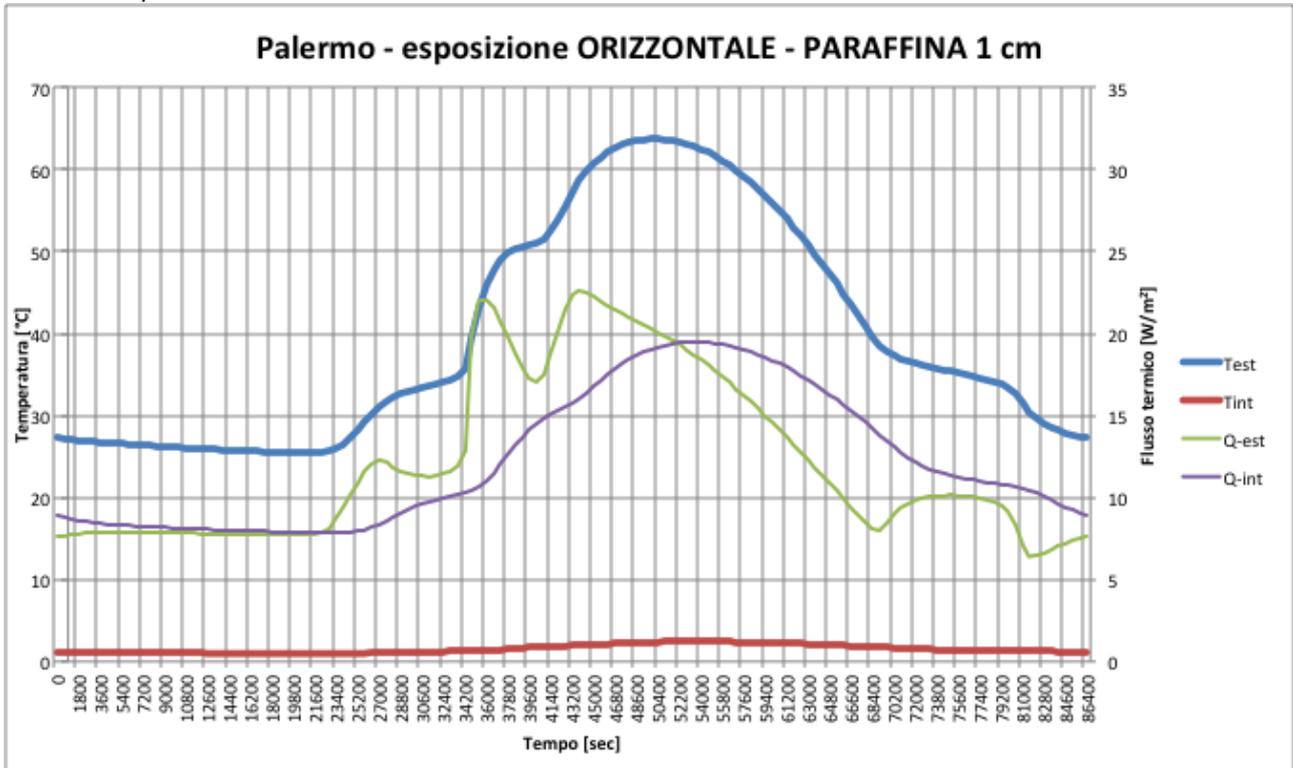
LOCALITÀ CLIMATICA: PALERMO  
MODELLO: BASE

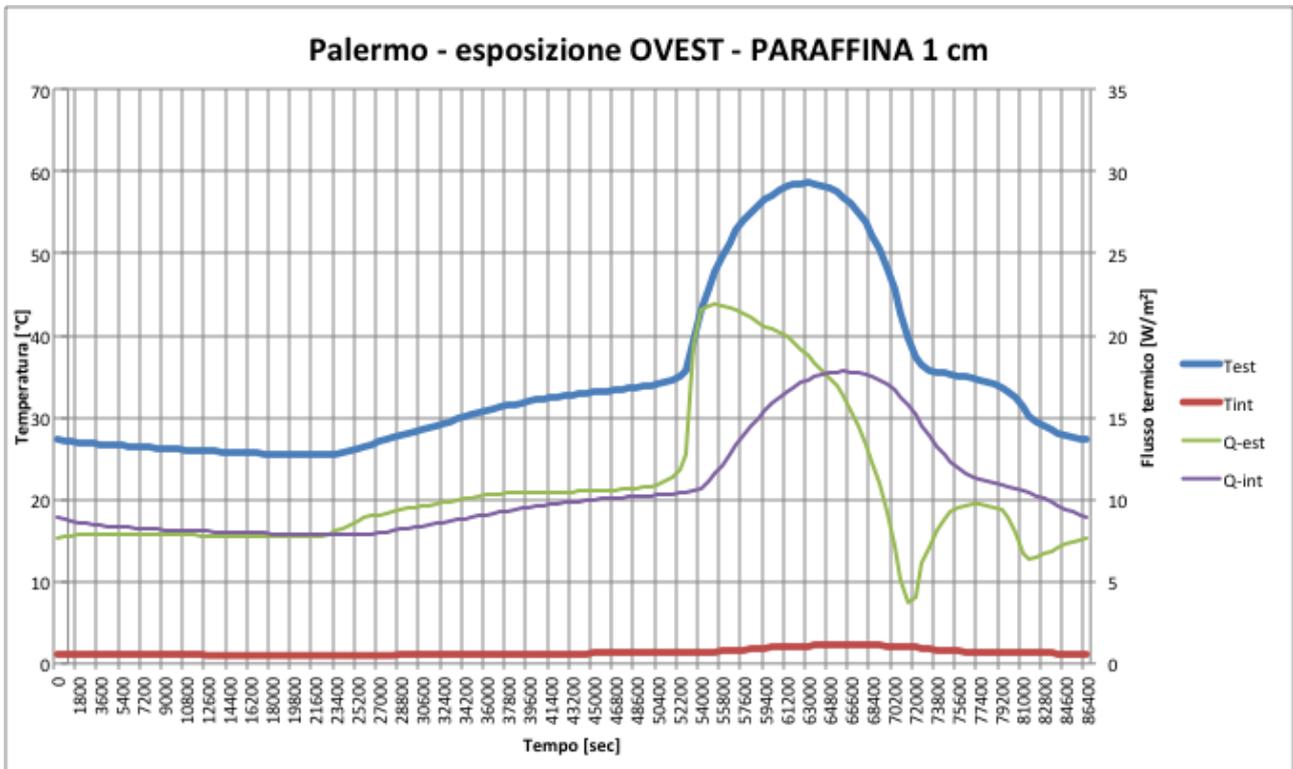
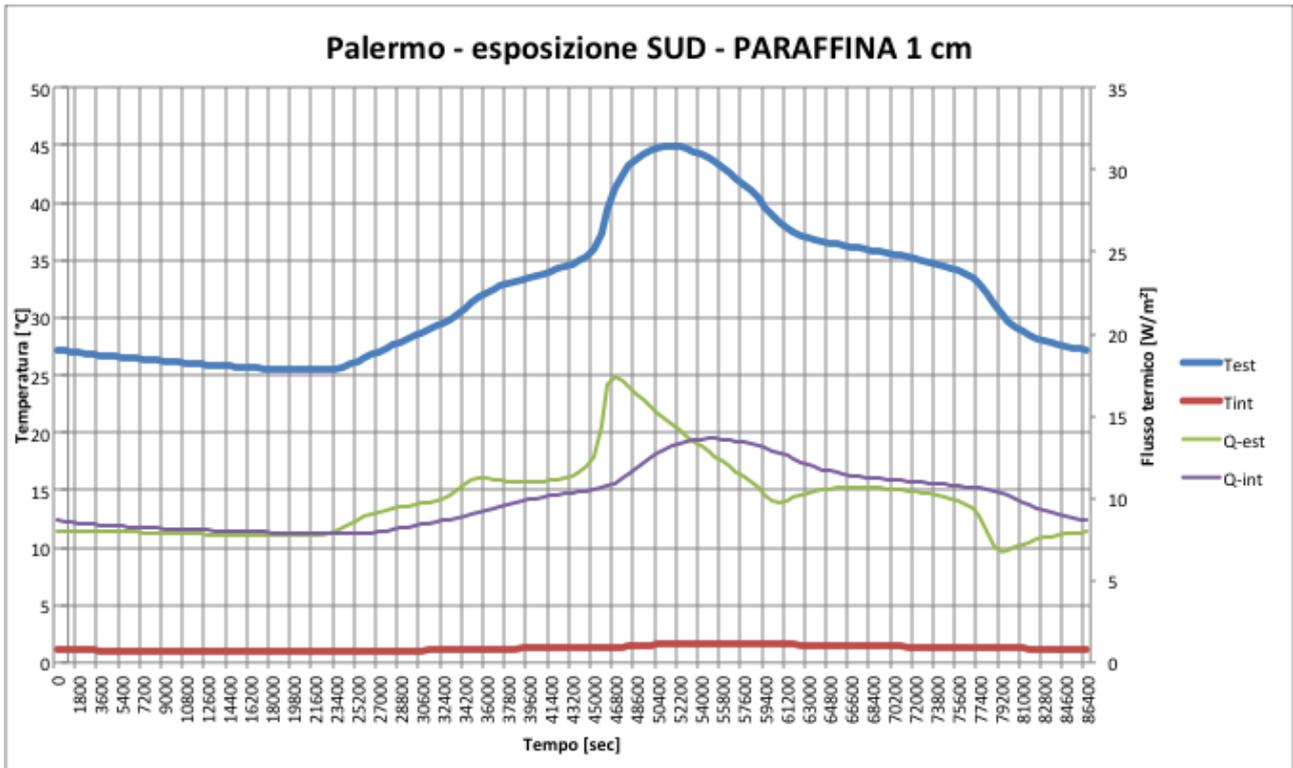


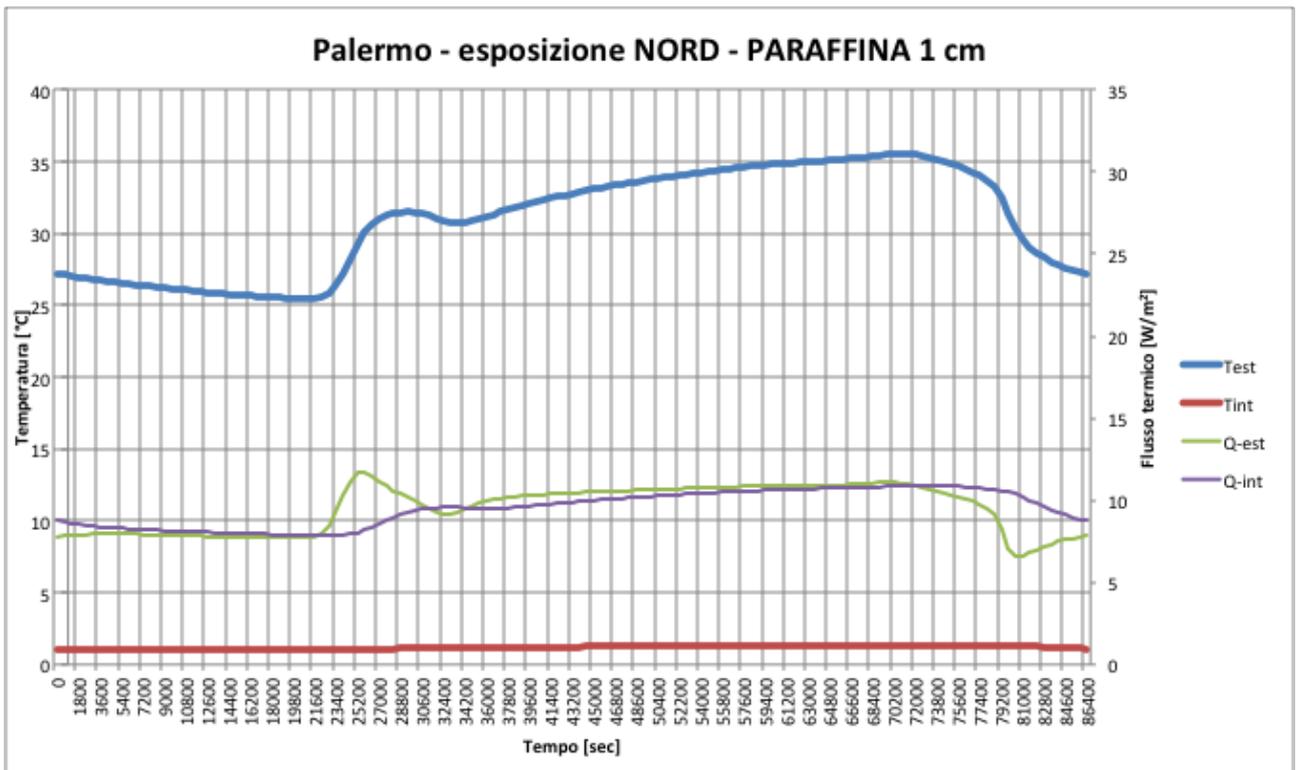




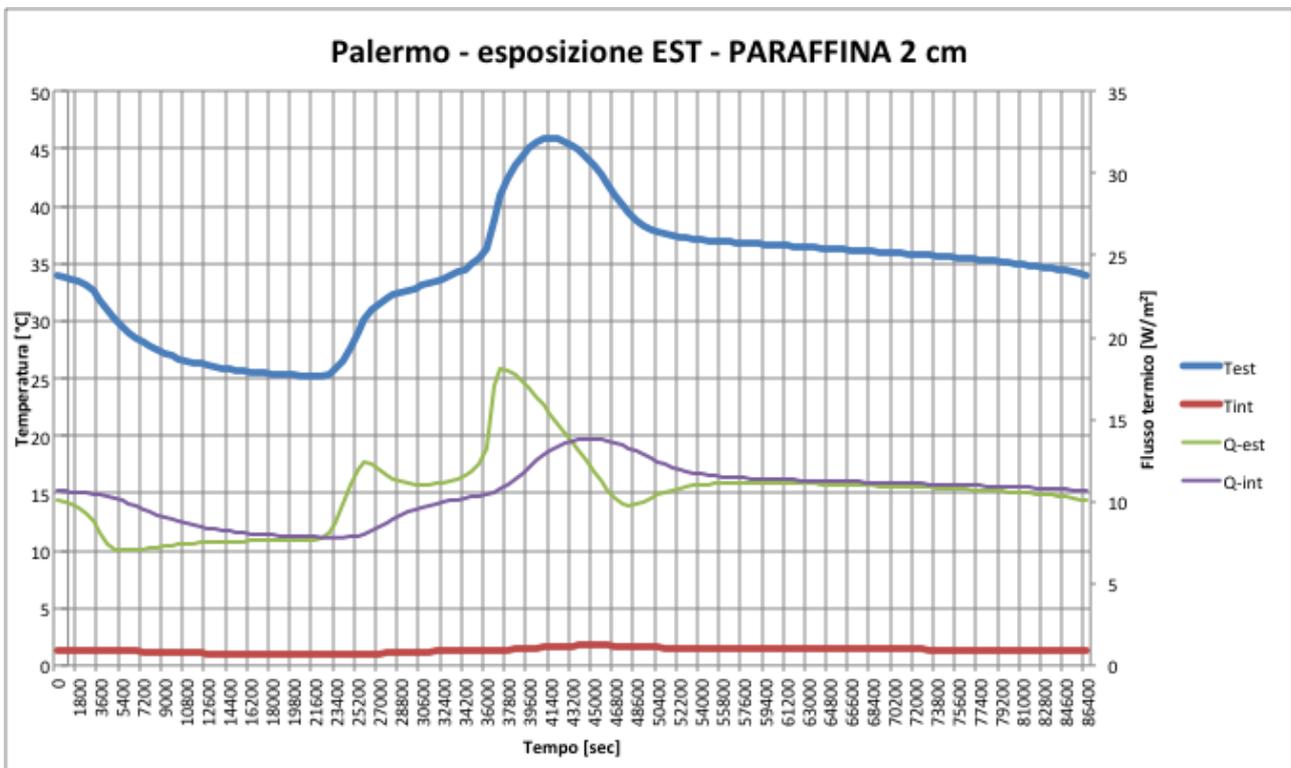
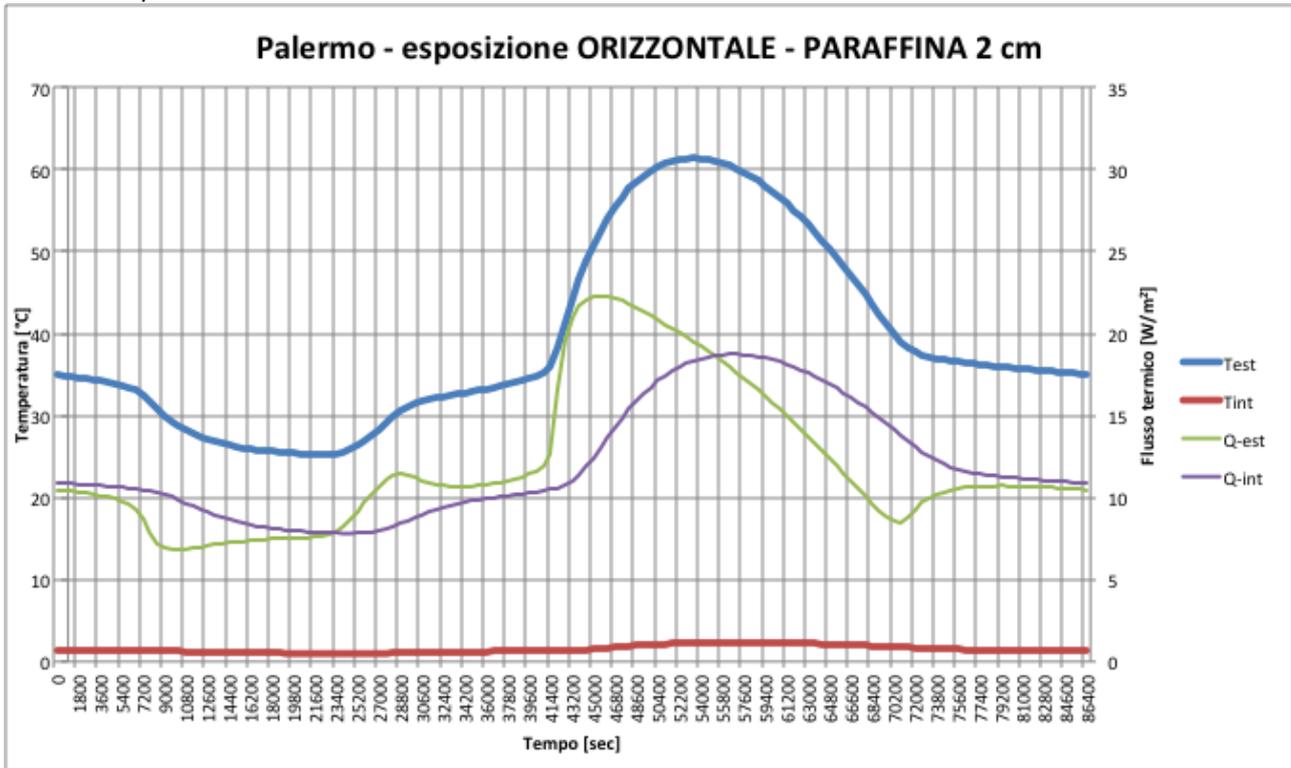
MODELLO: paraffina RT35 – 1 cm

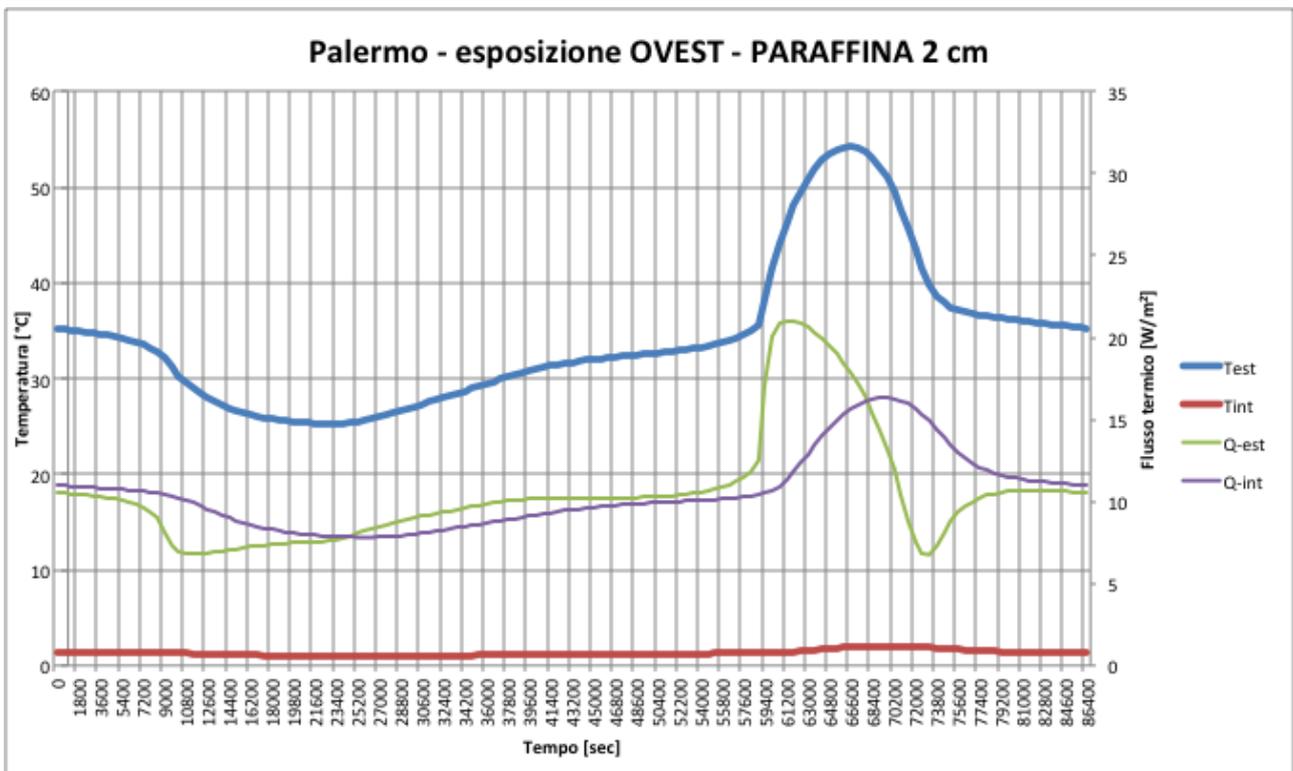
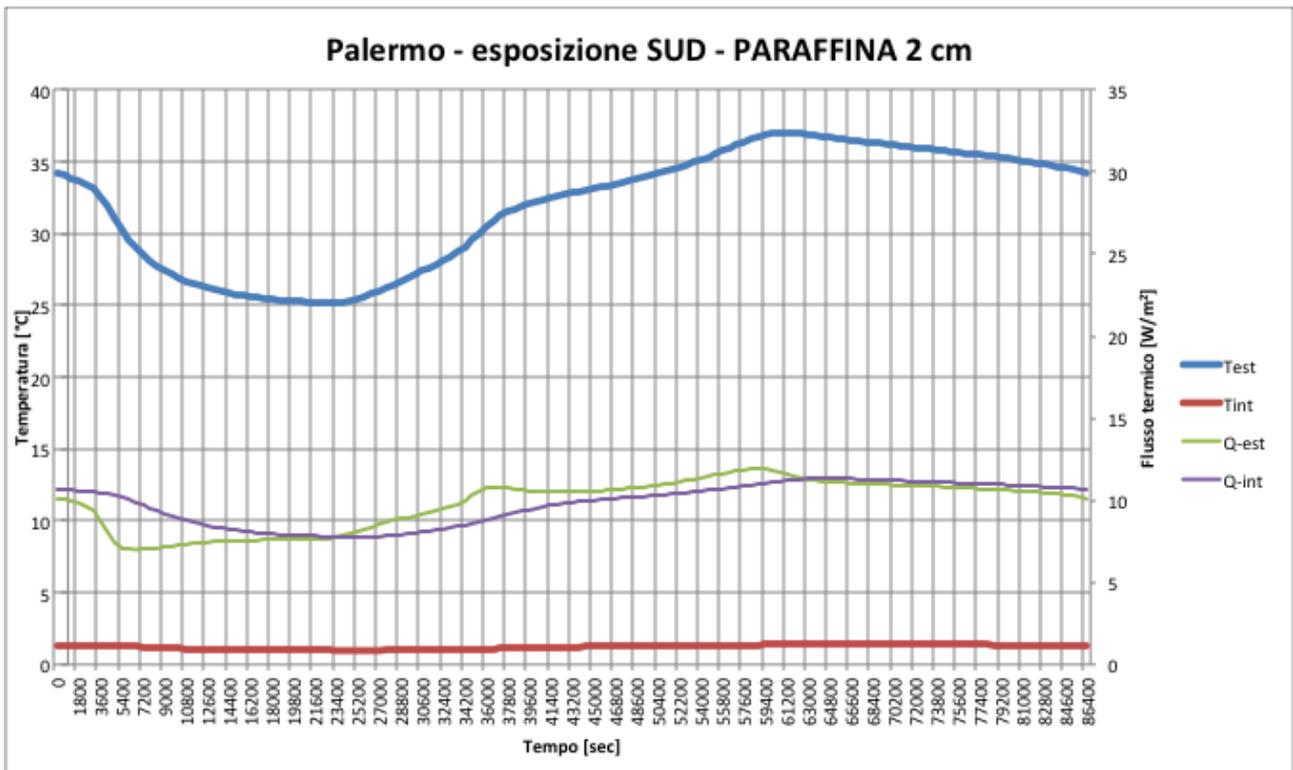


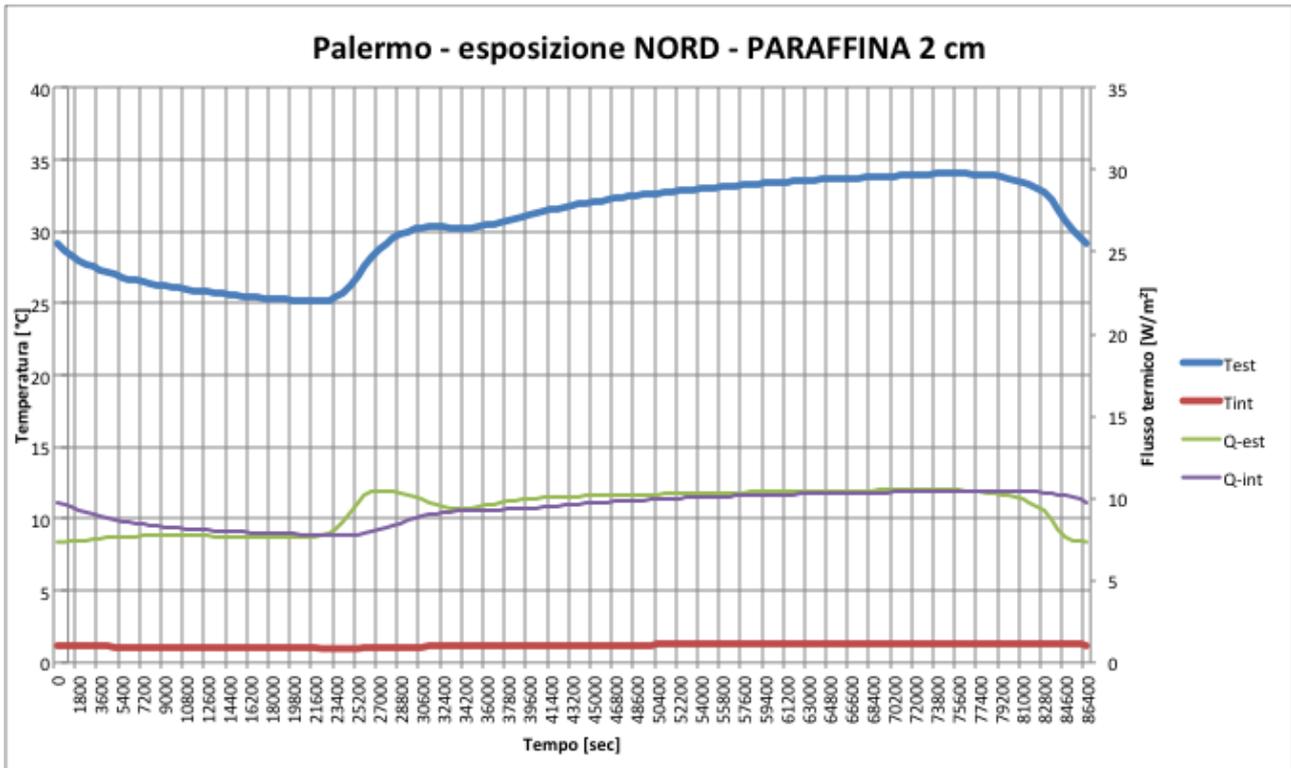




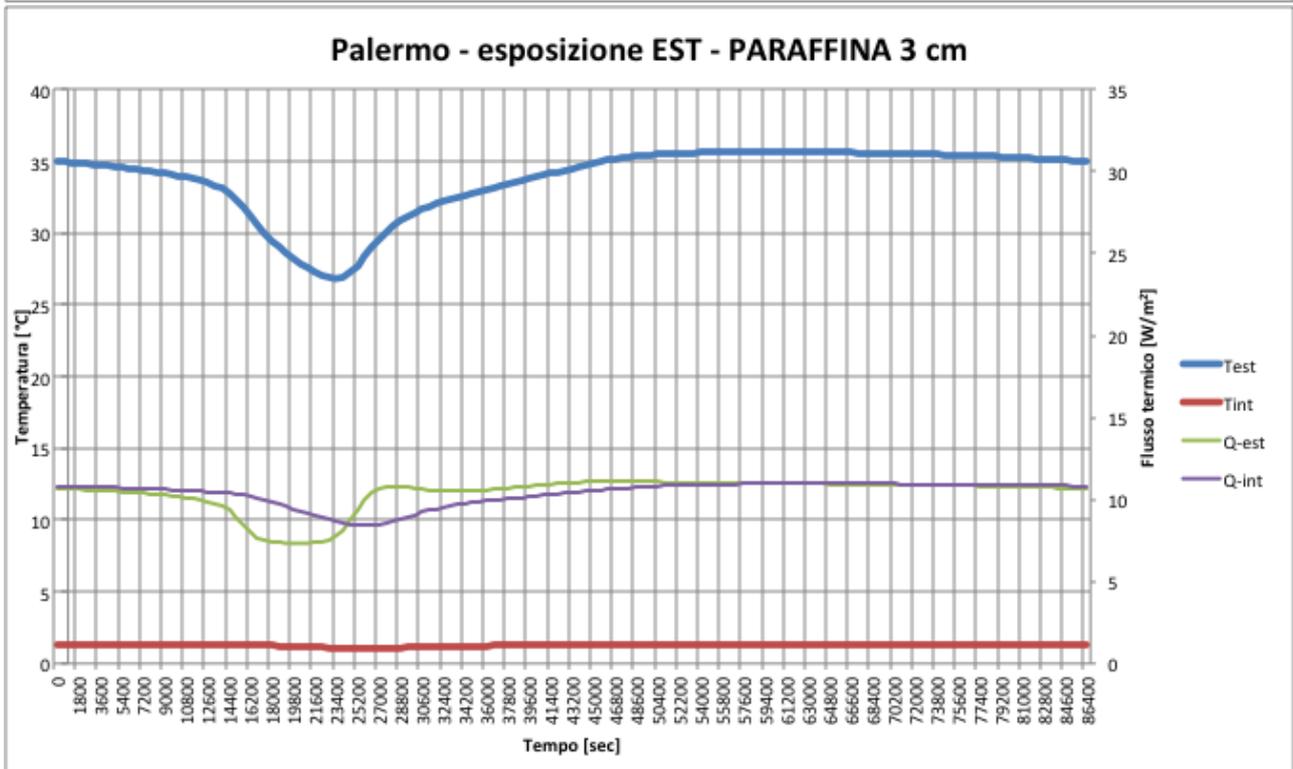
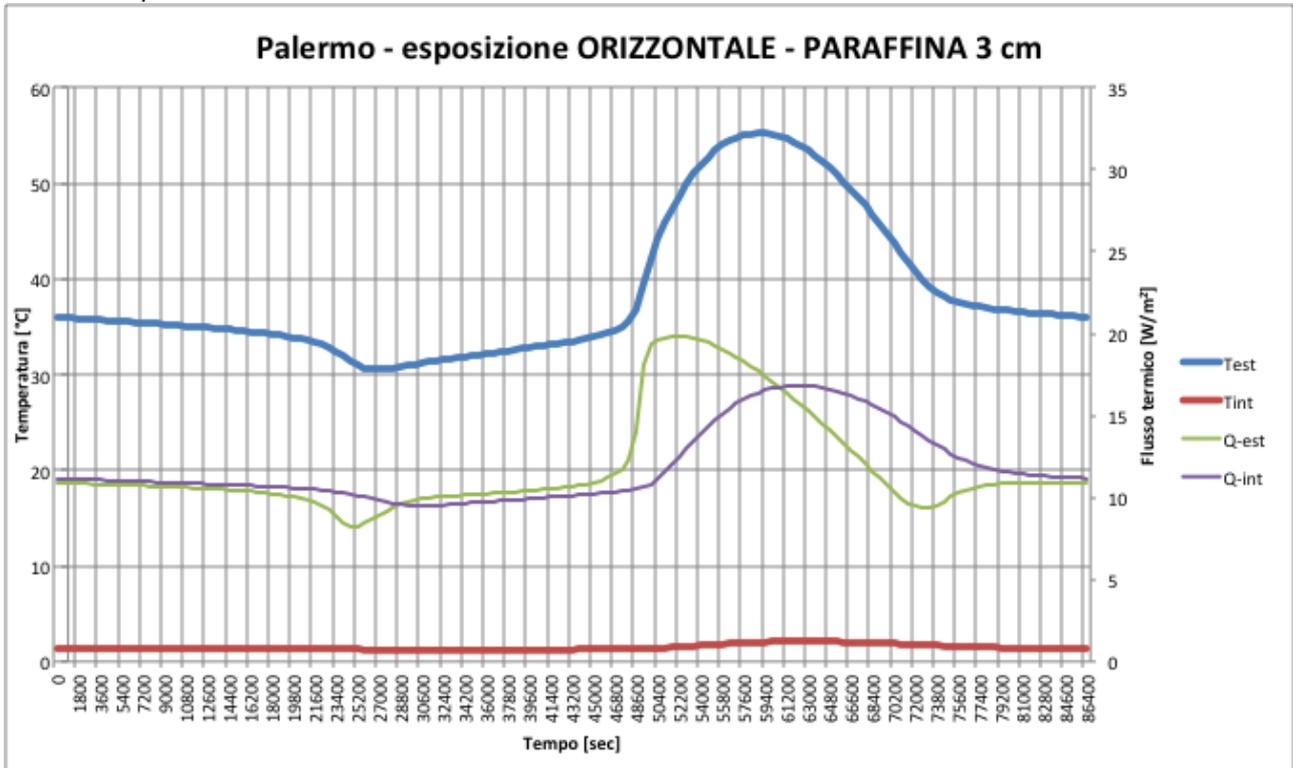
MODELLO: paraffina RT35 – 2 cm

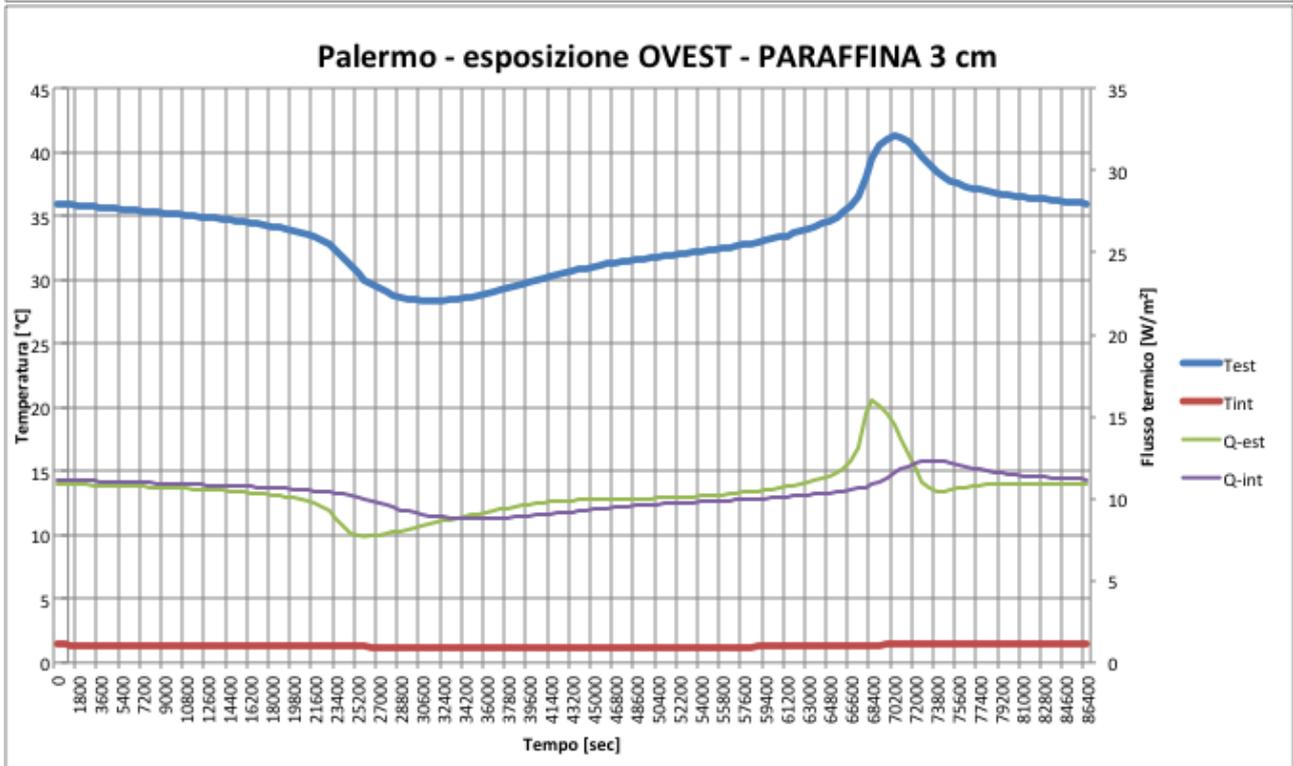
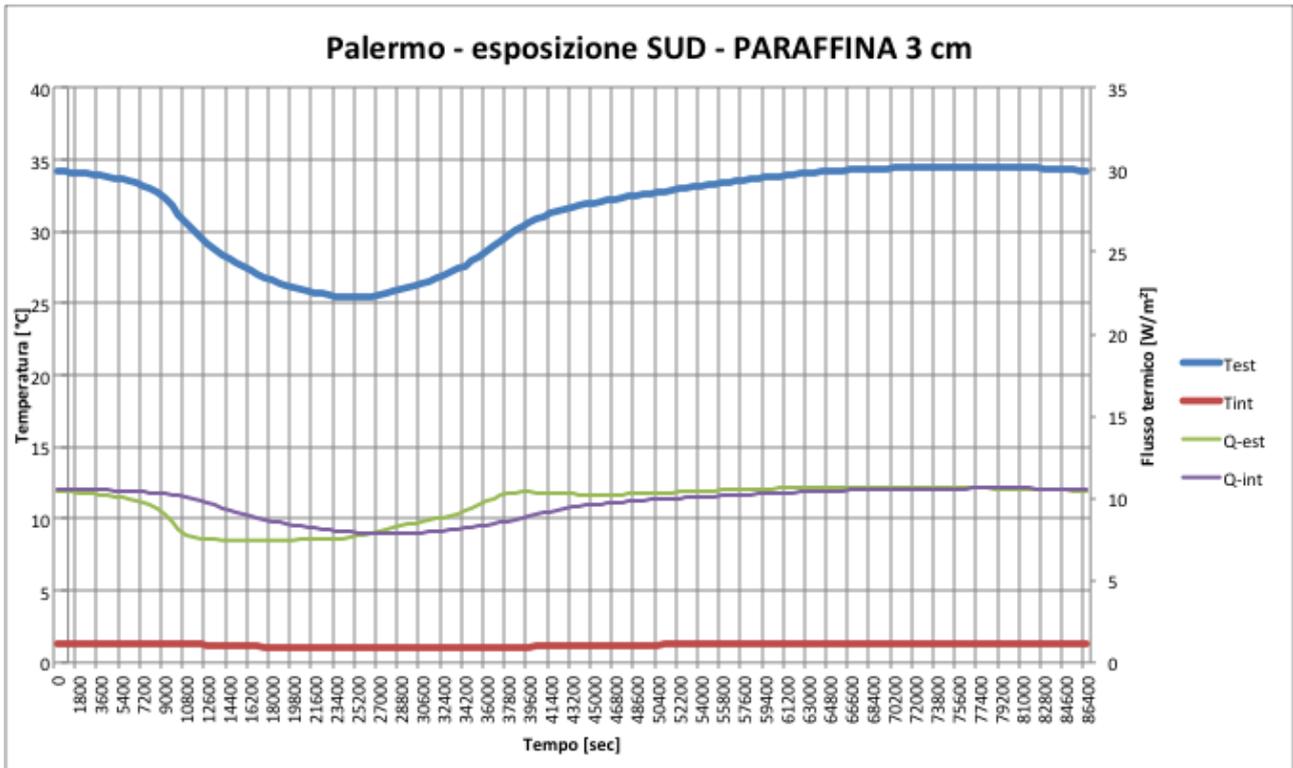


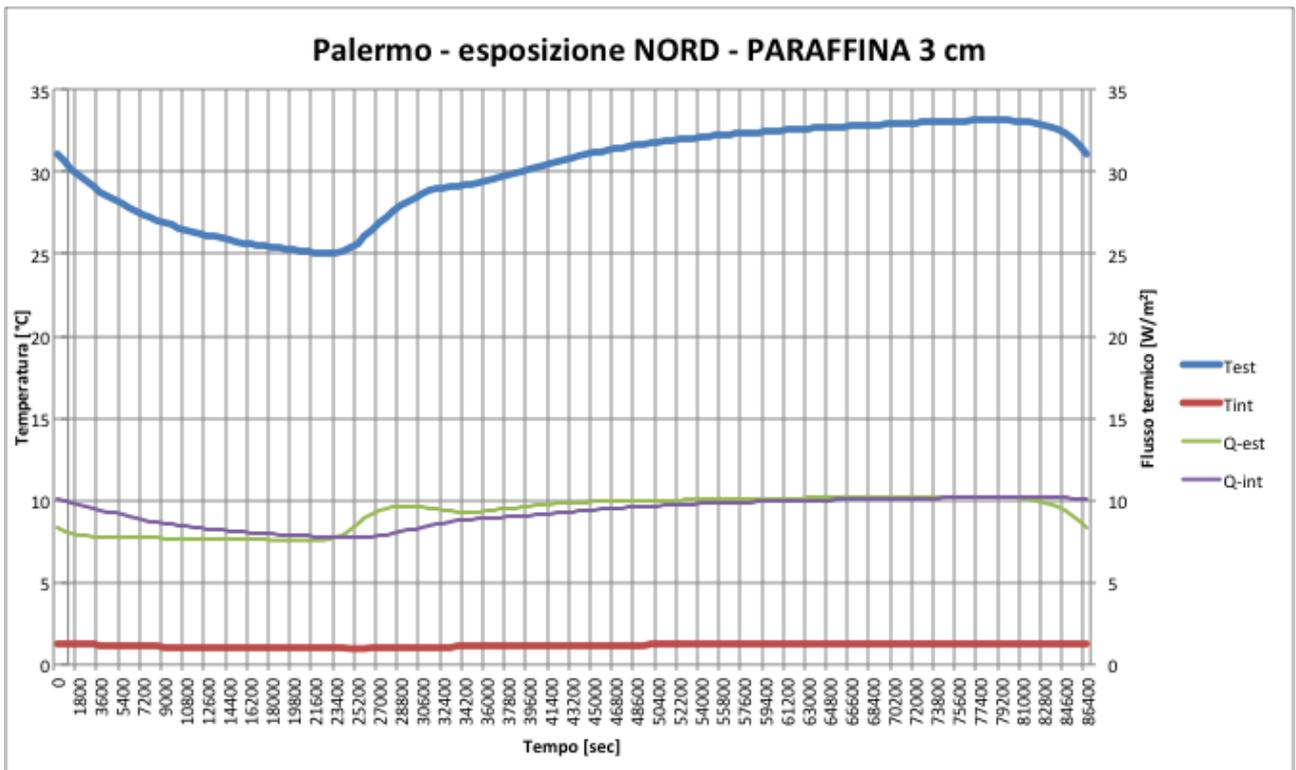




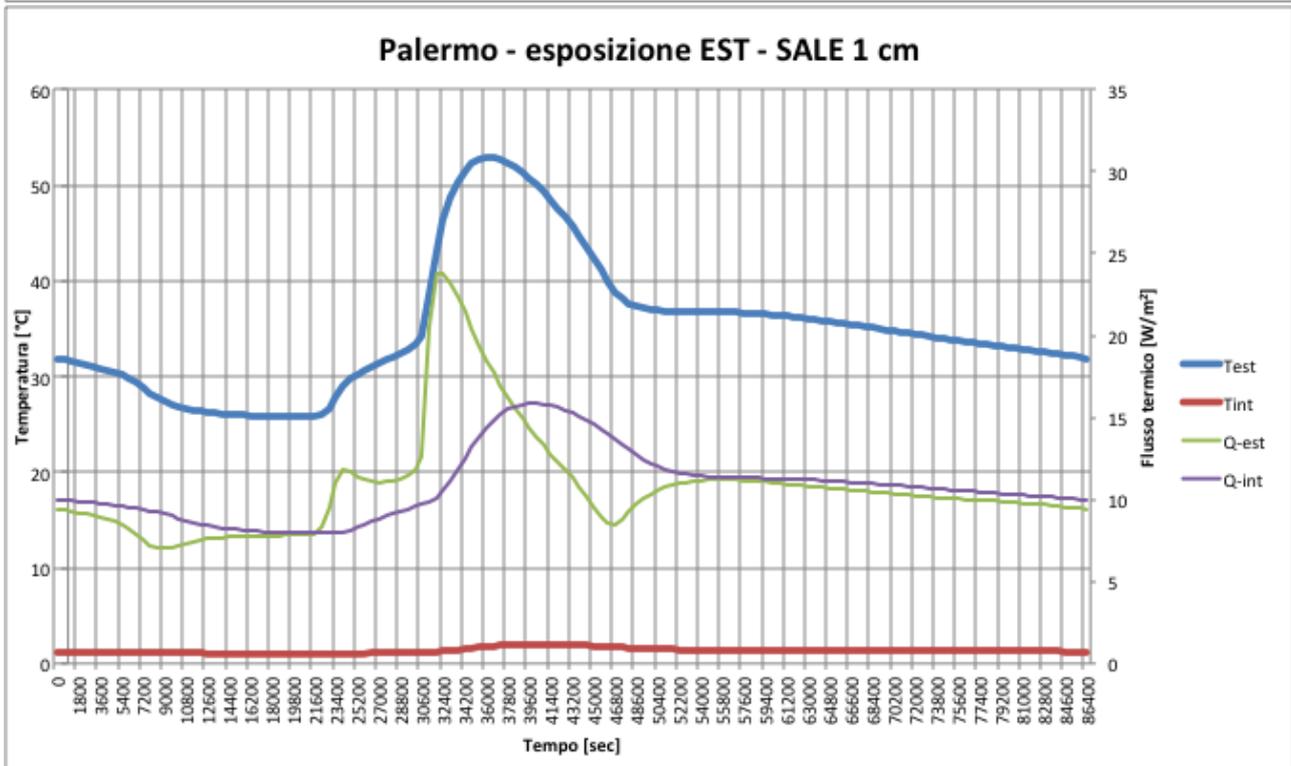
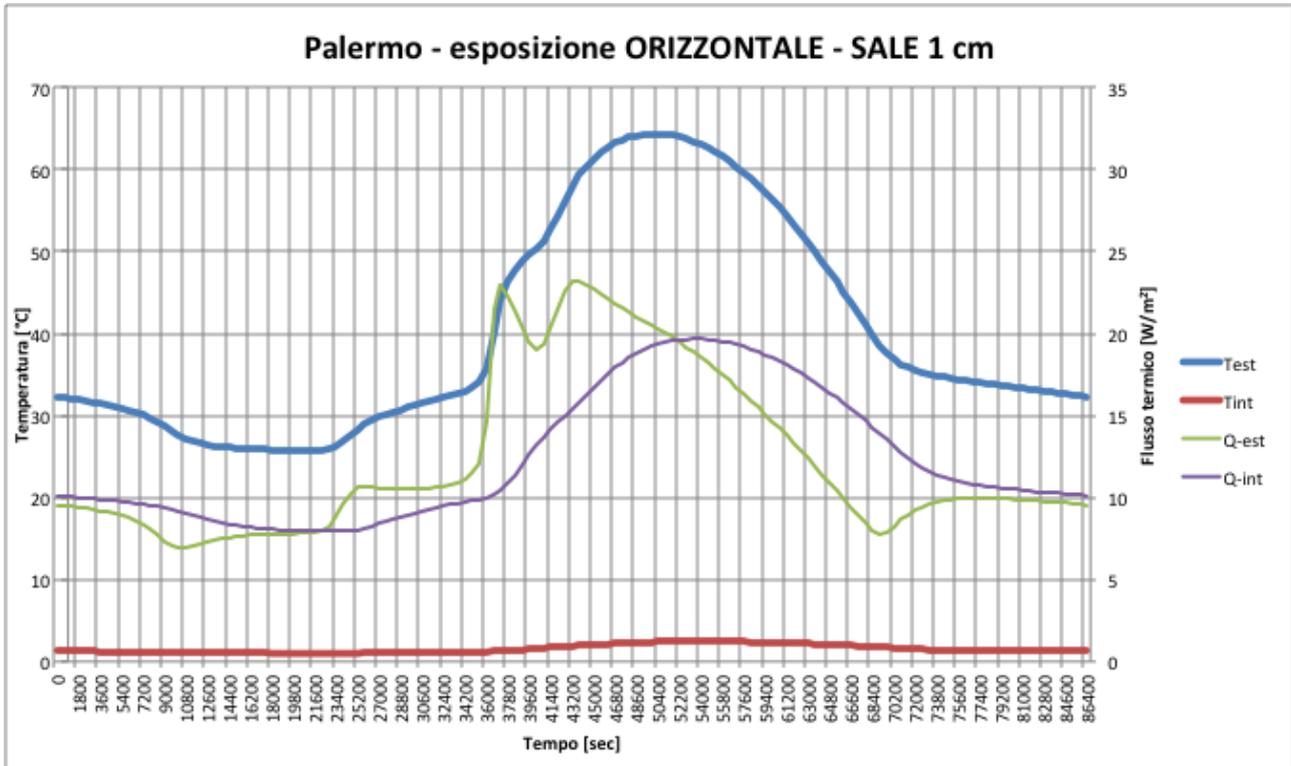
MODELLO: paraffina RT35 – 3 cm

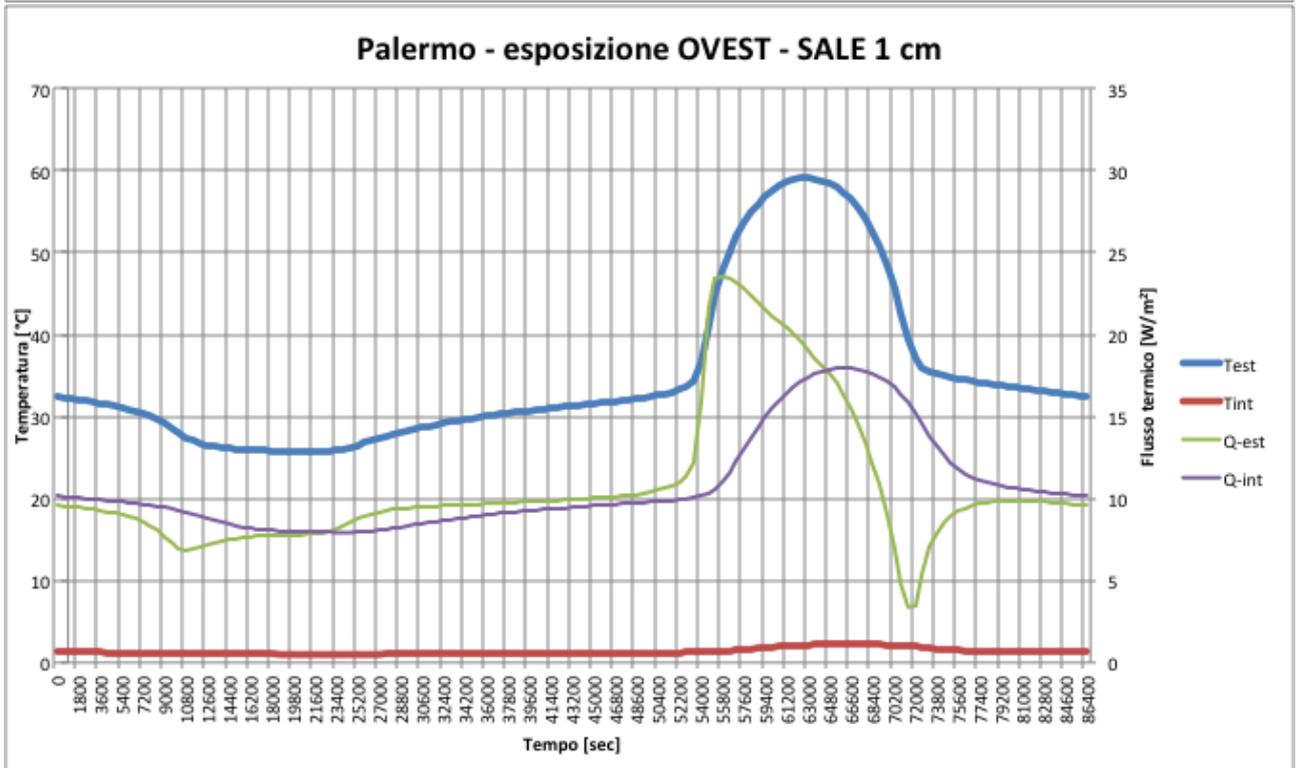
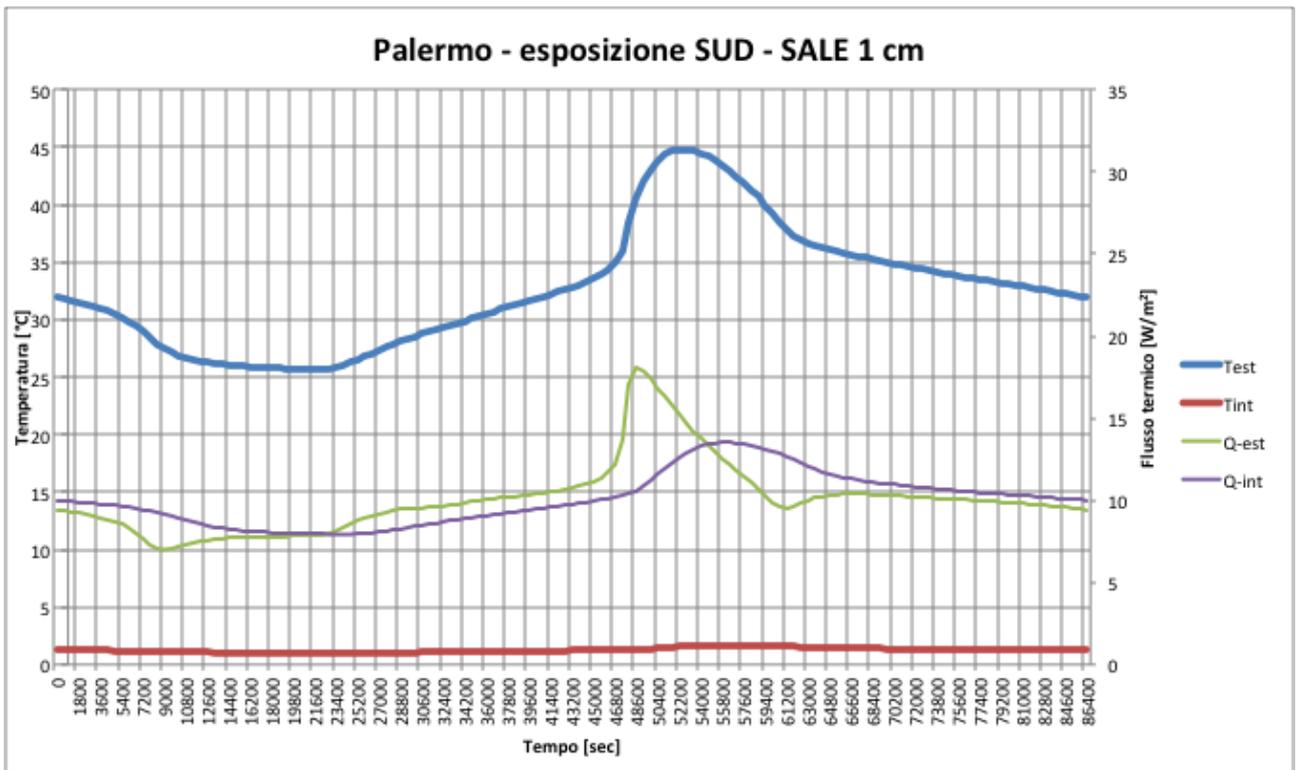


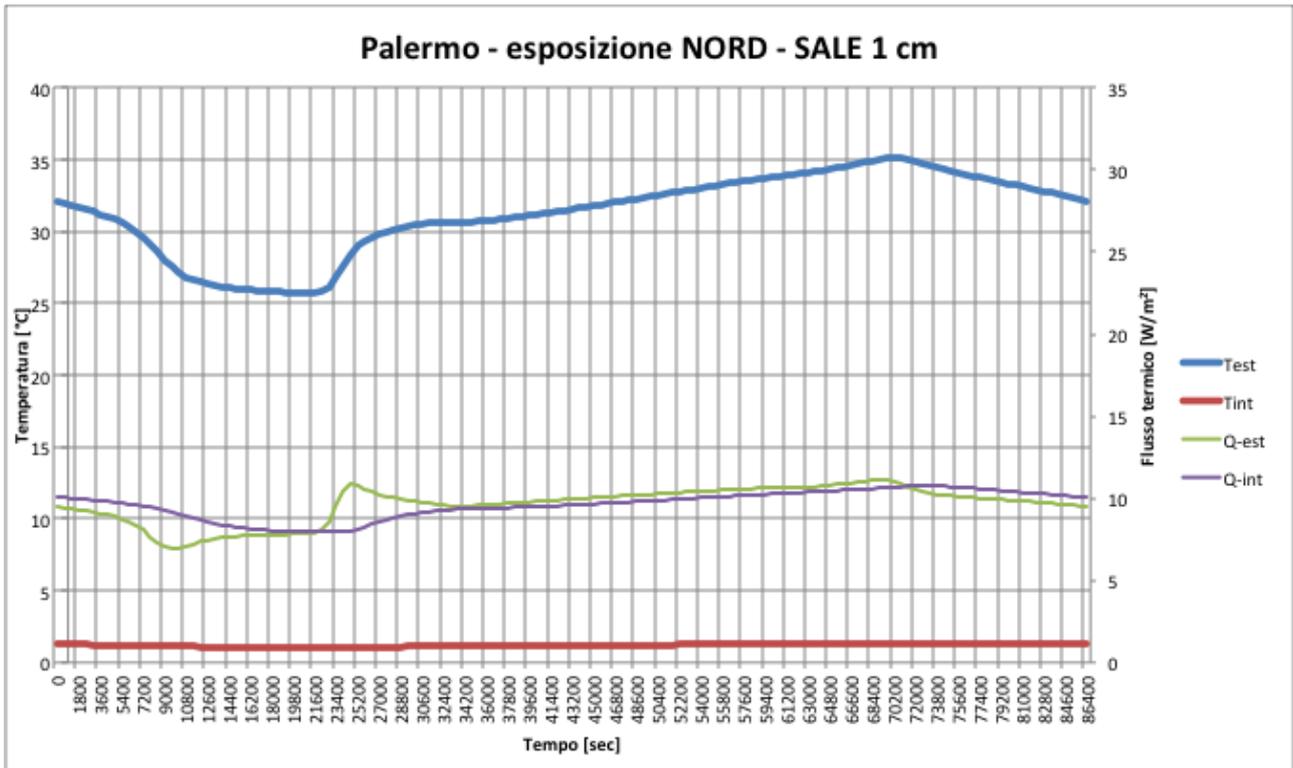




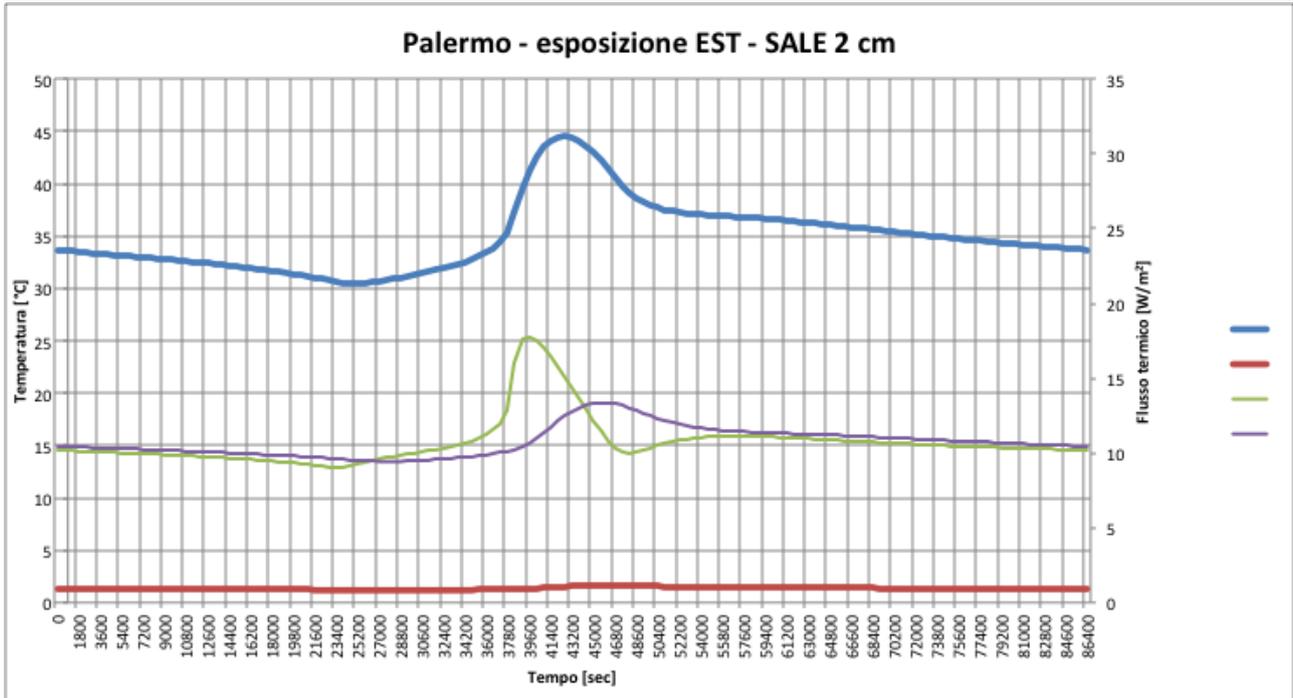
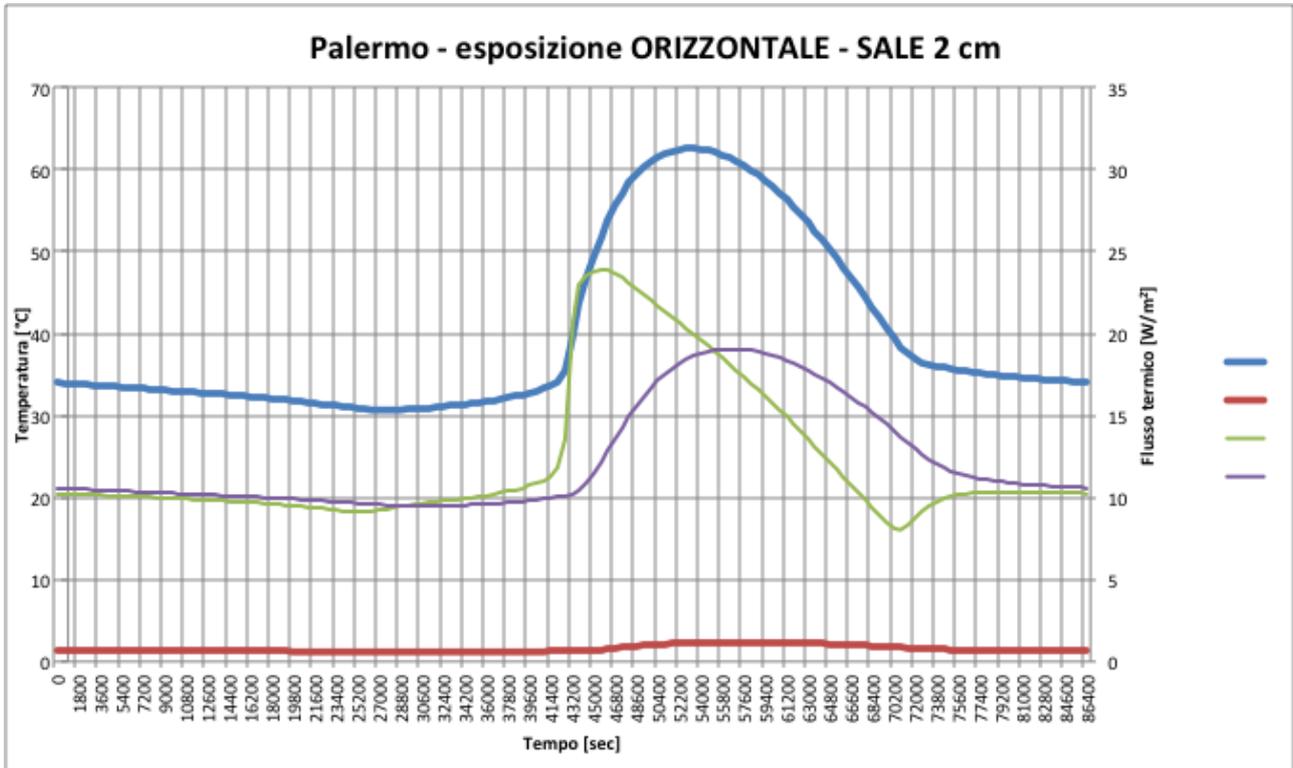
MODELLO: SALE C32 -1 cm

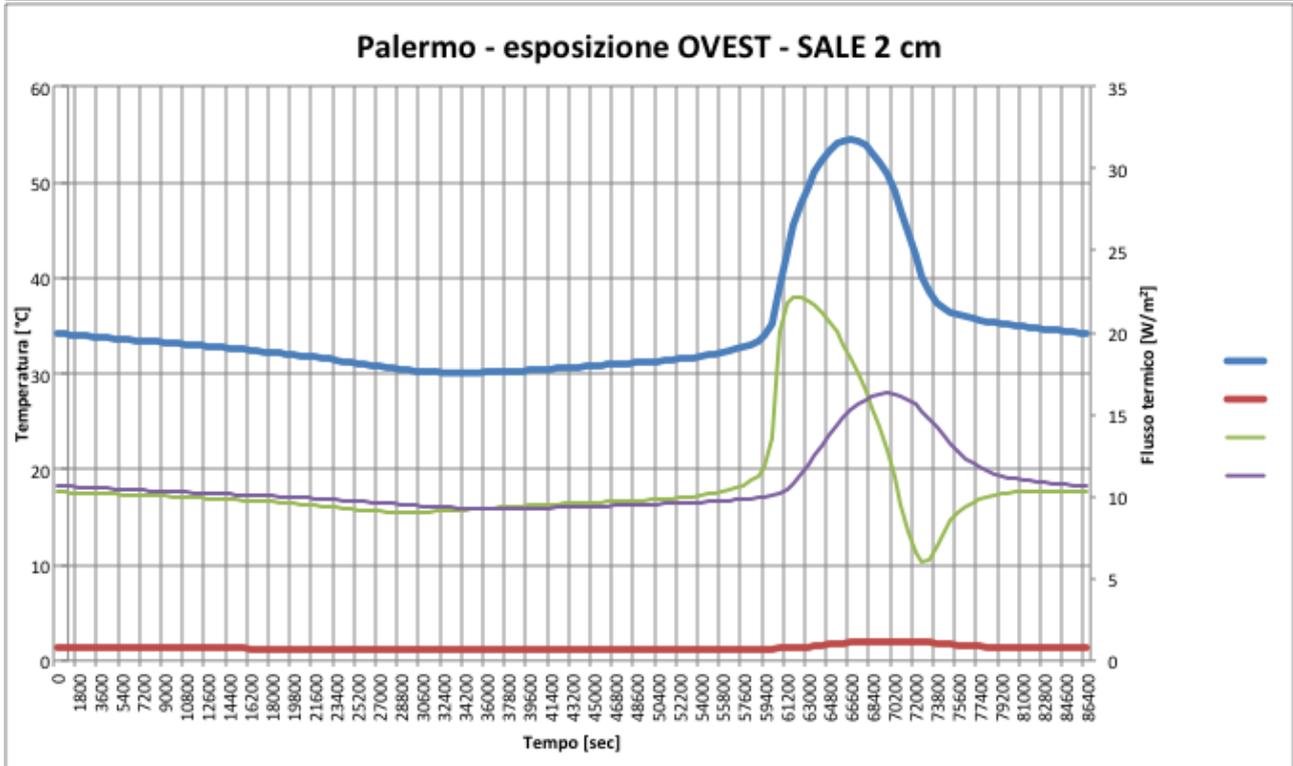
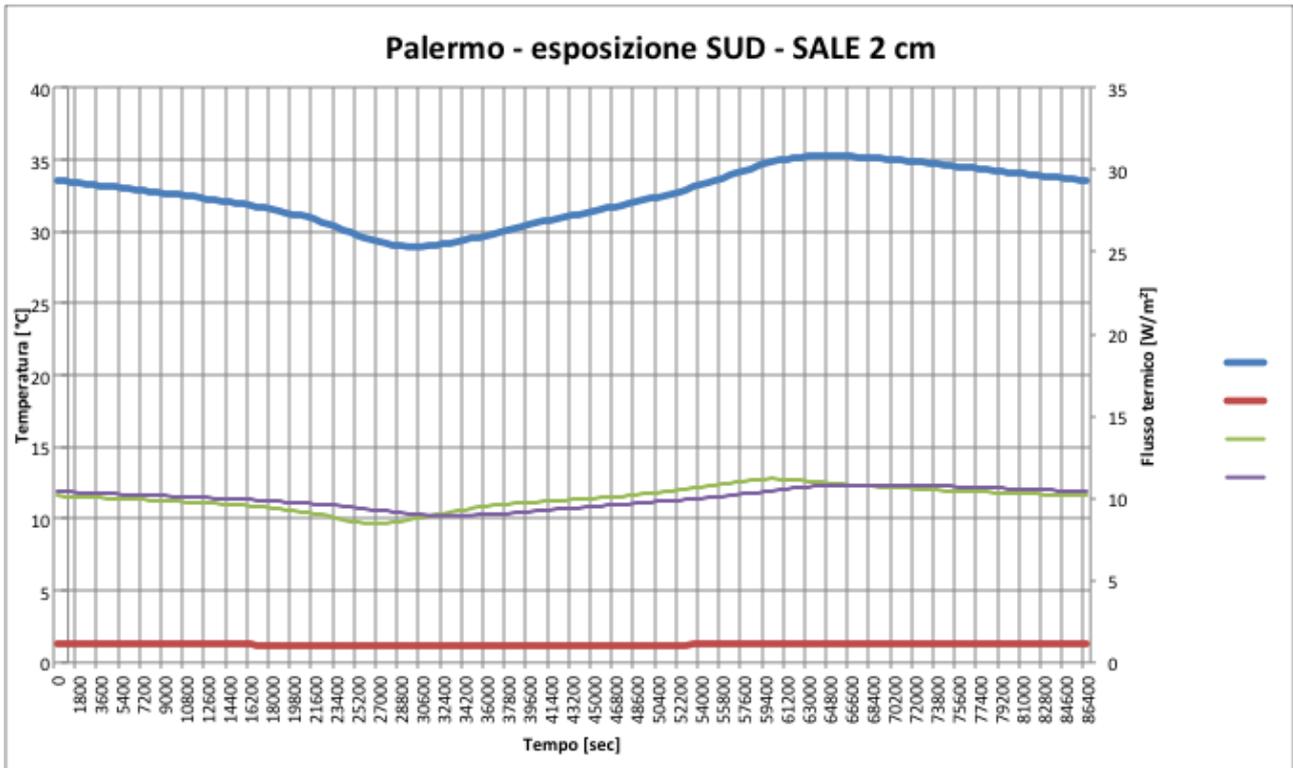


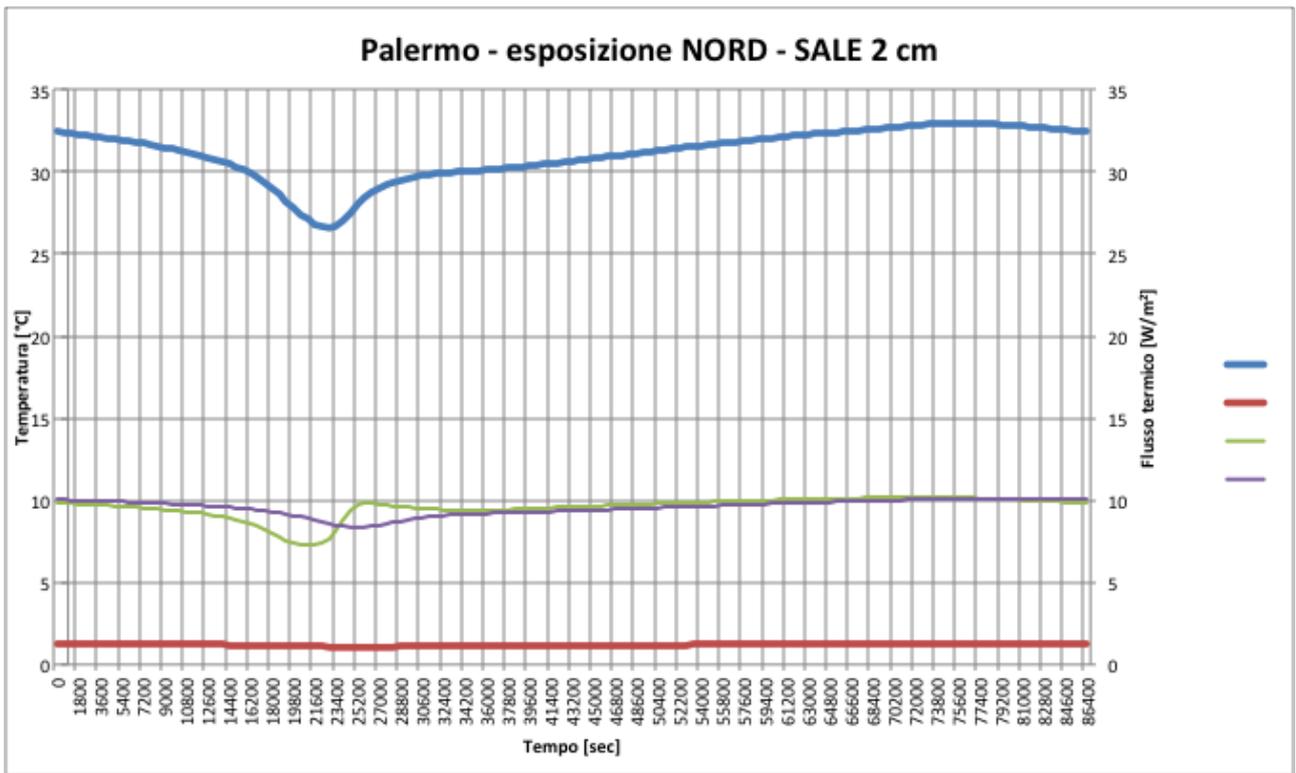




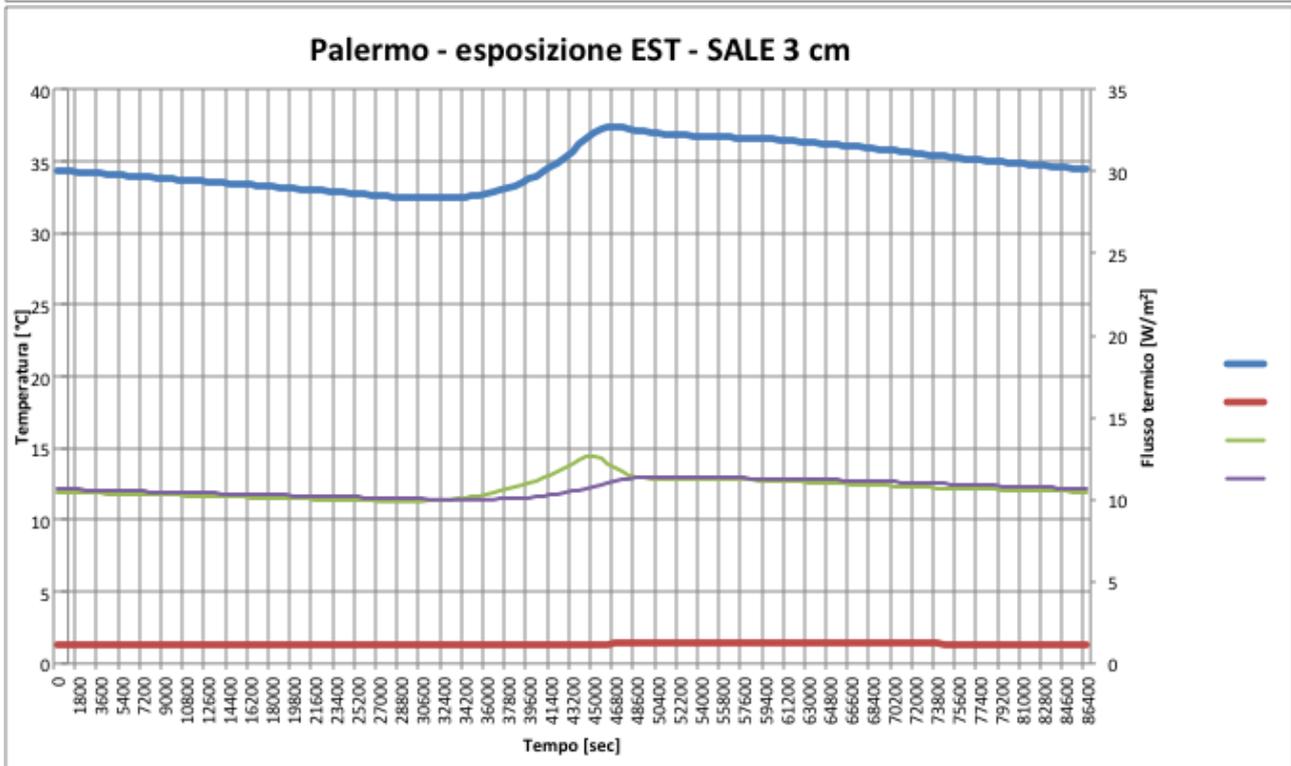
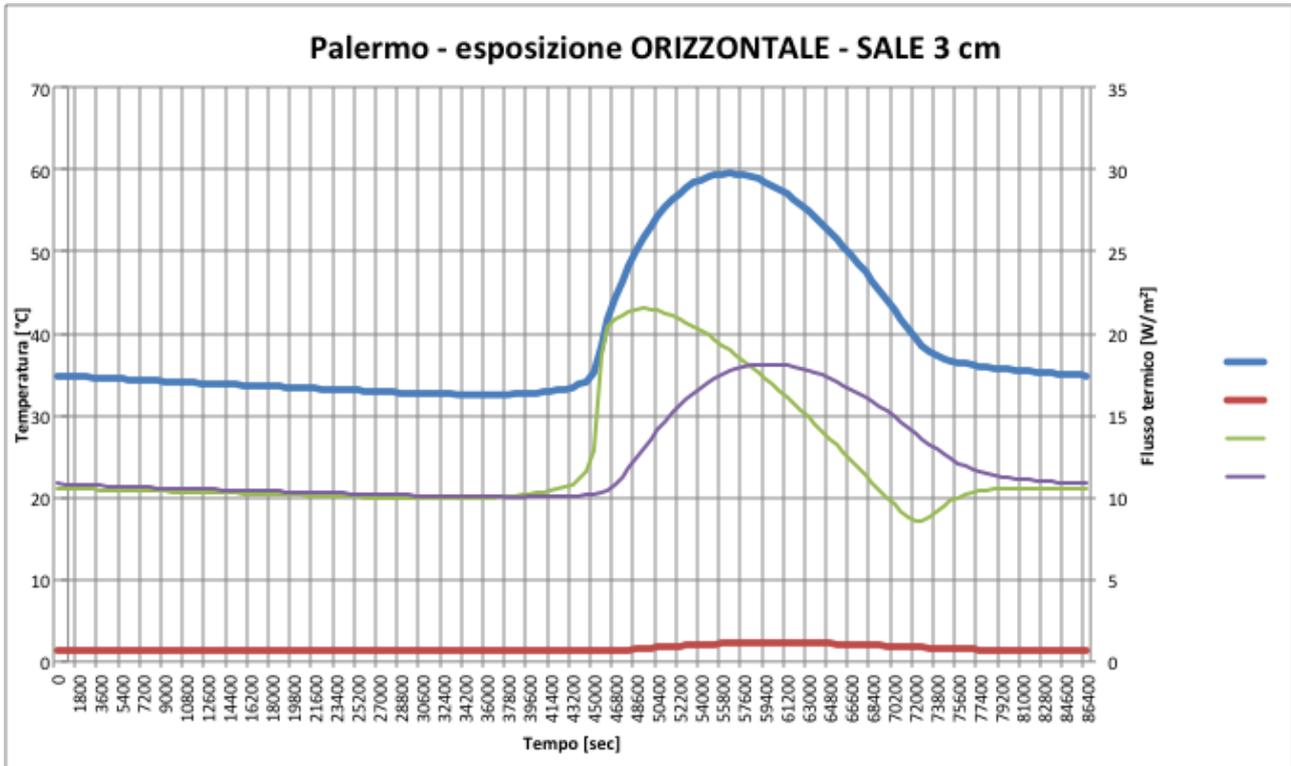
MODELLO: sale C32 – 2 cm

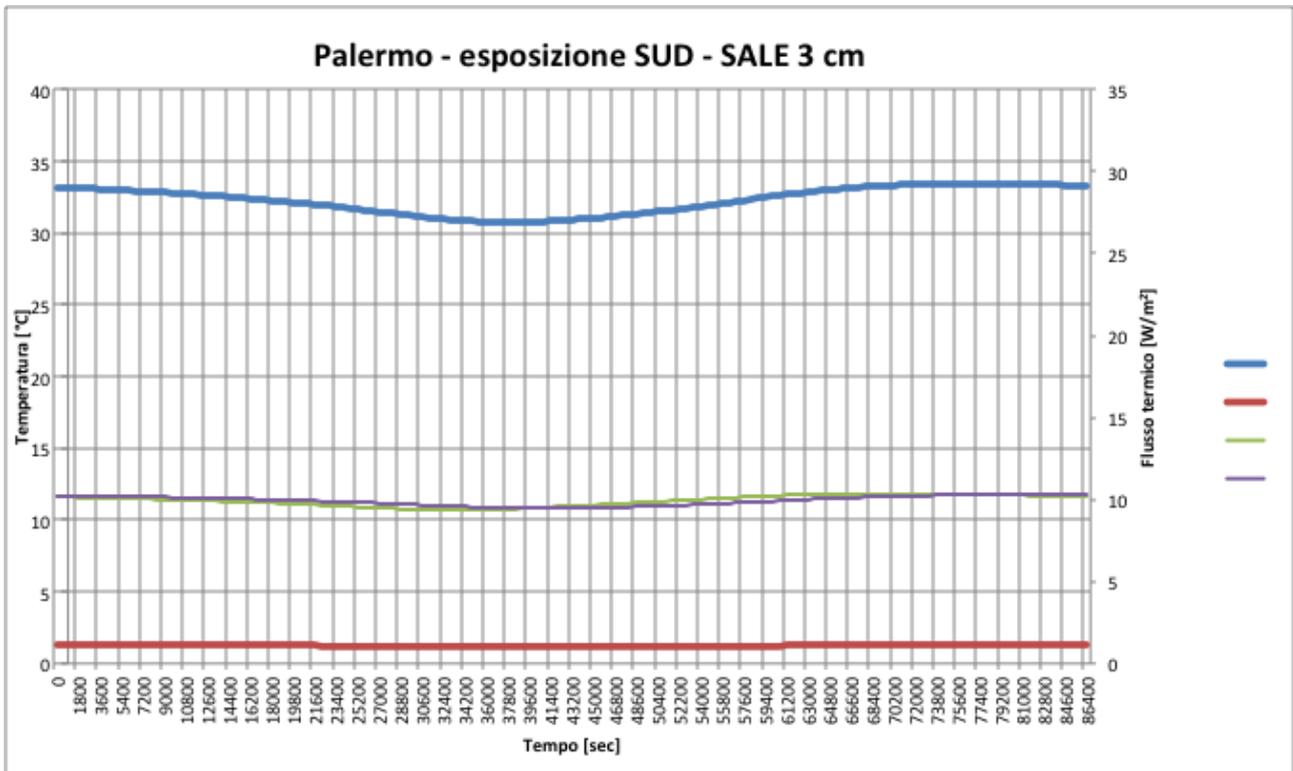
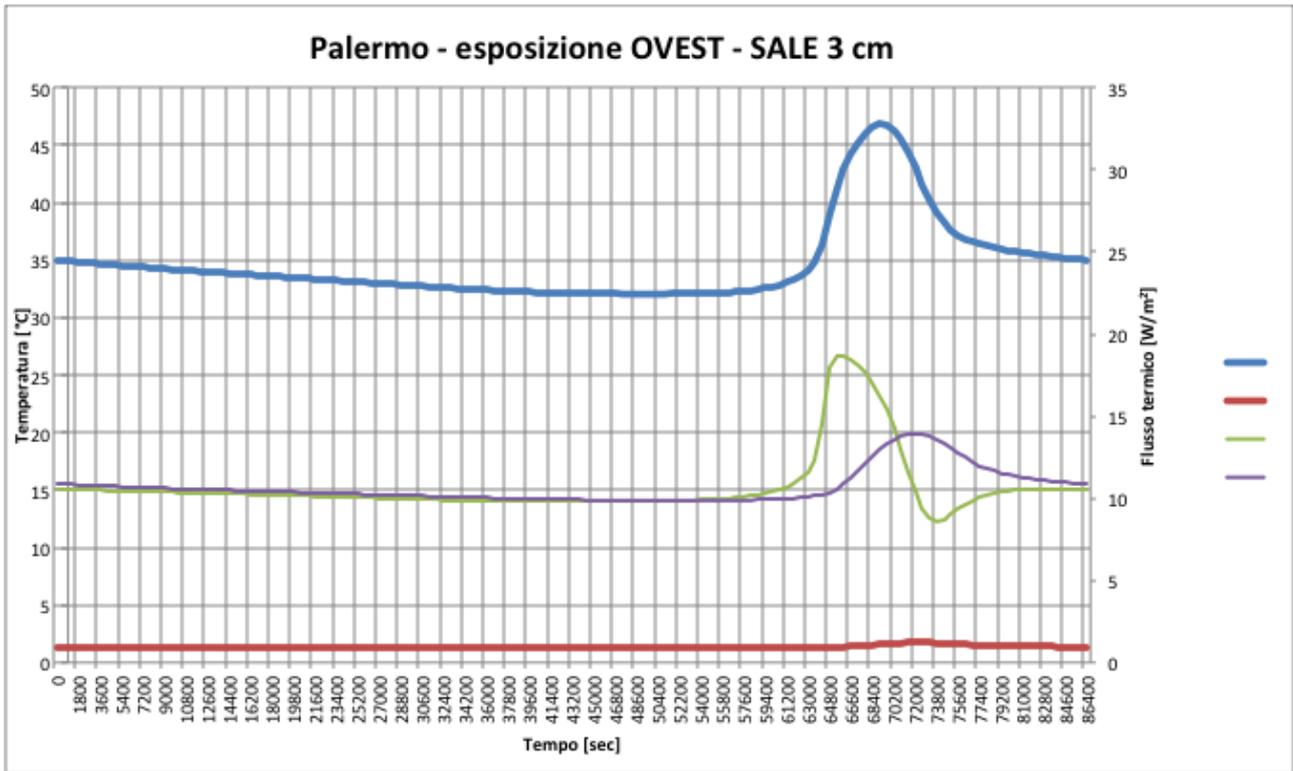


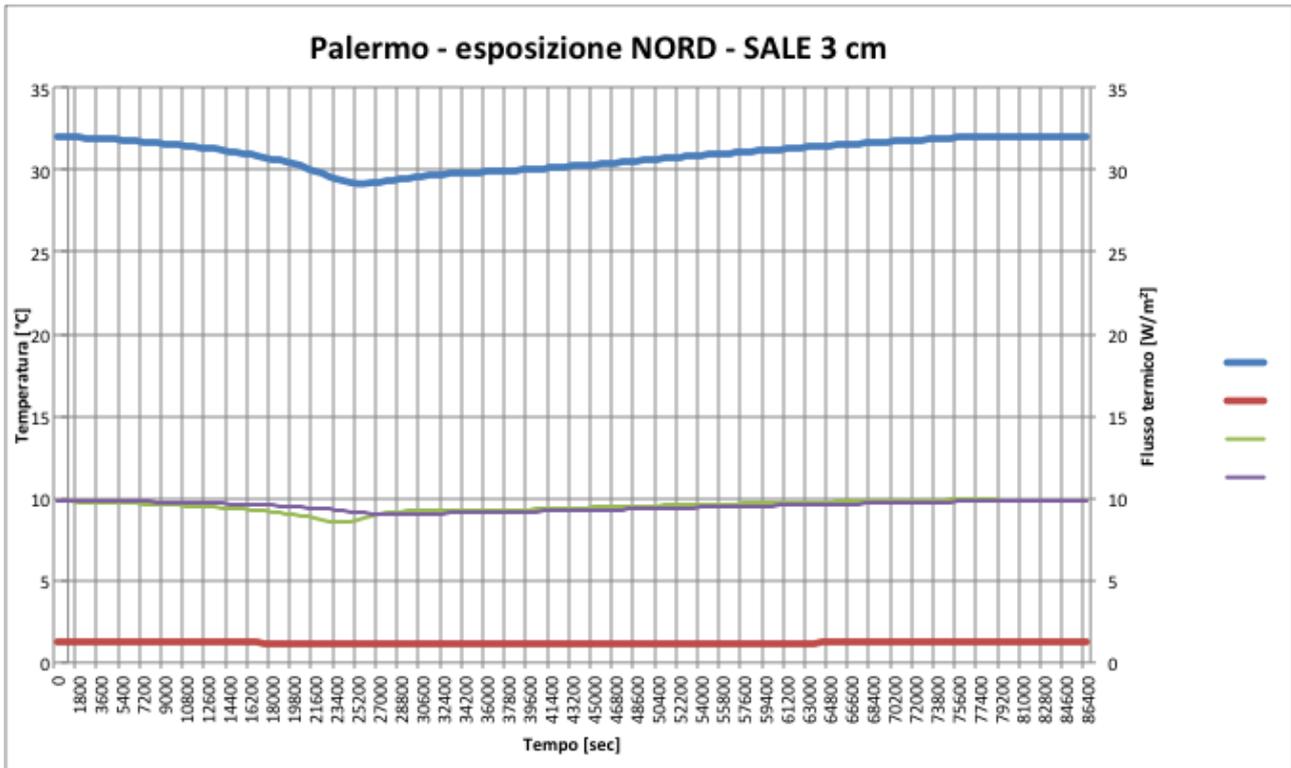




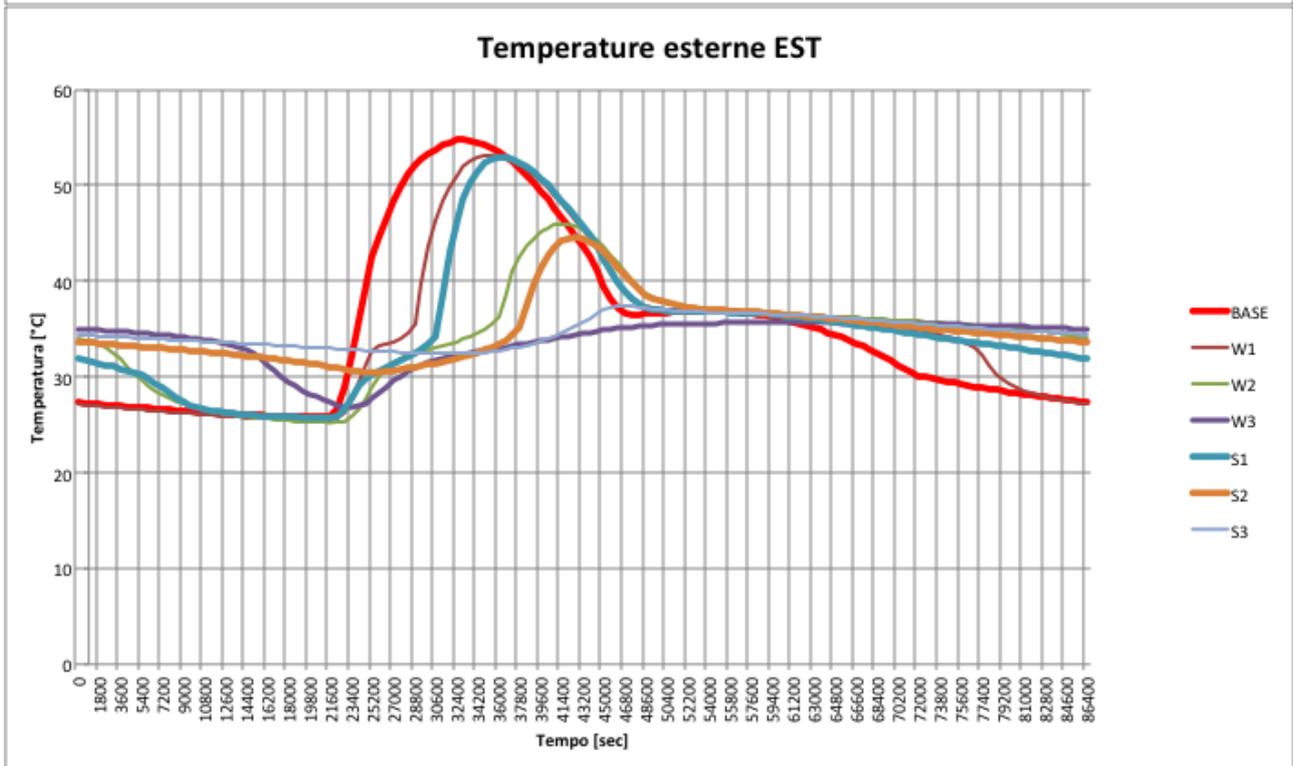
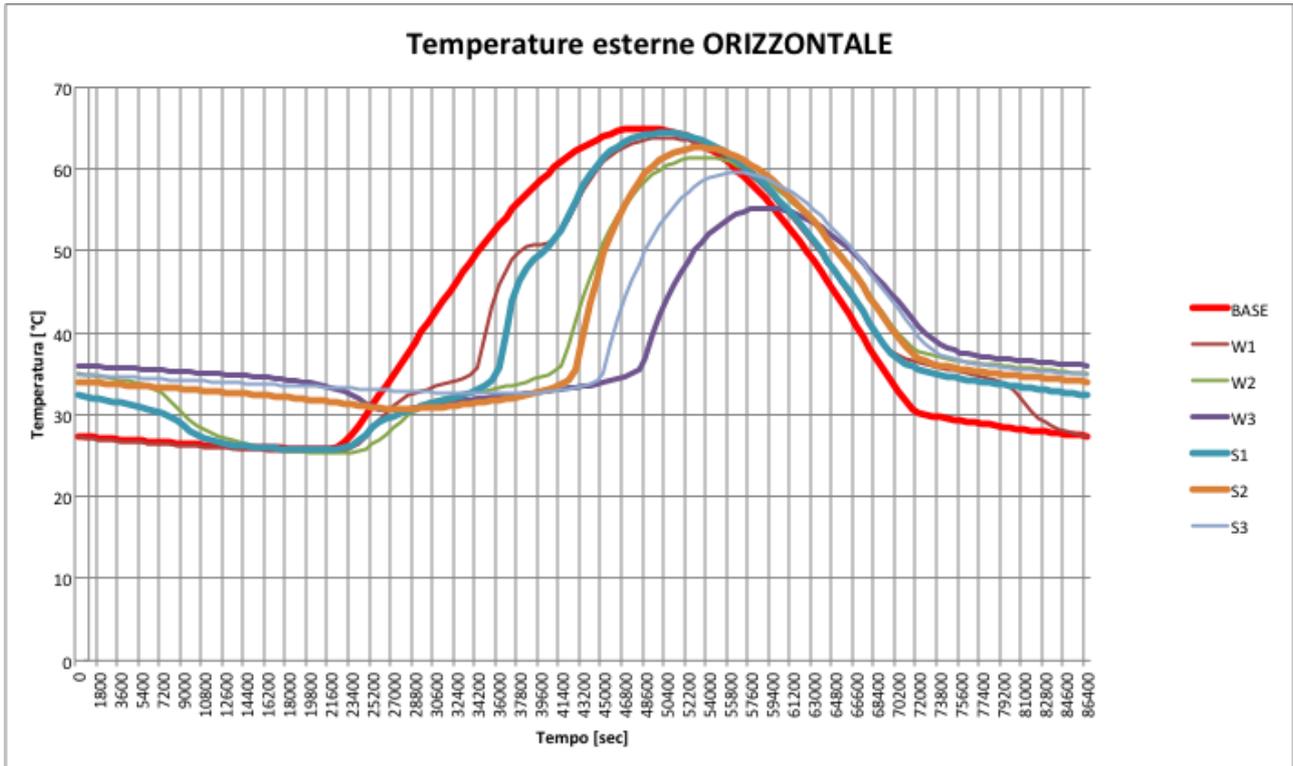
MODELLO: sale C32 – 3cm

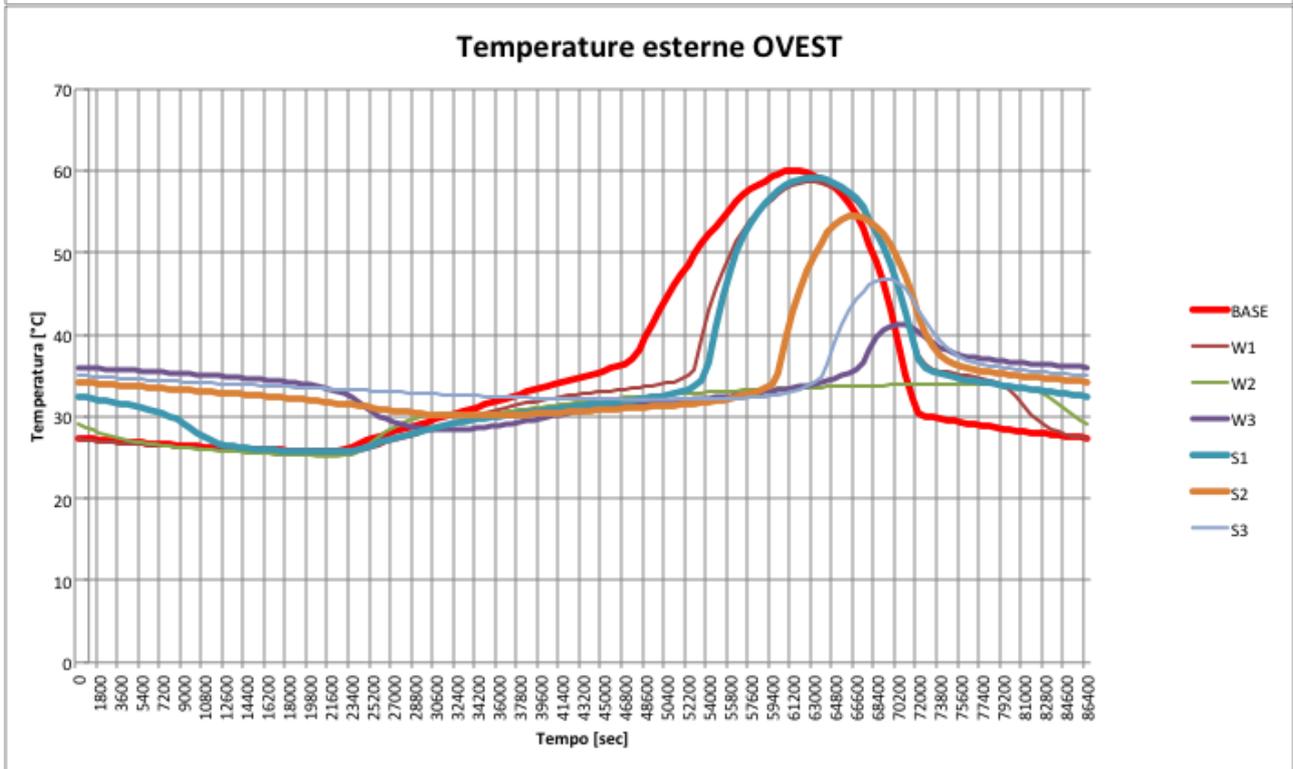
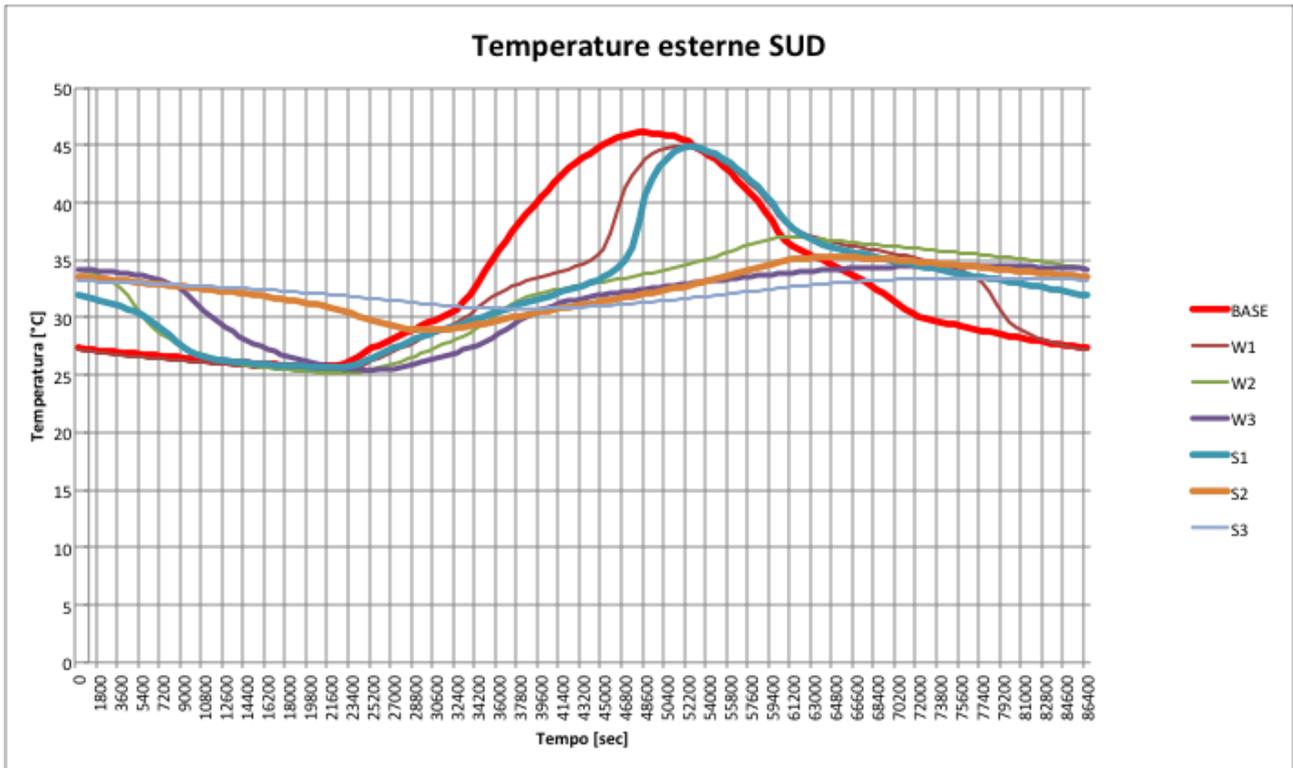


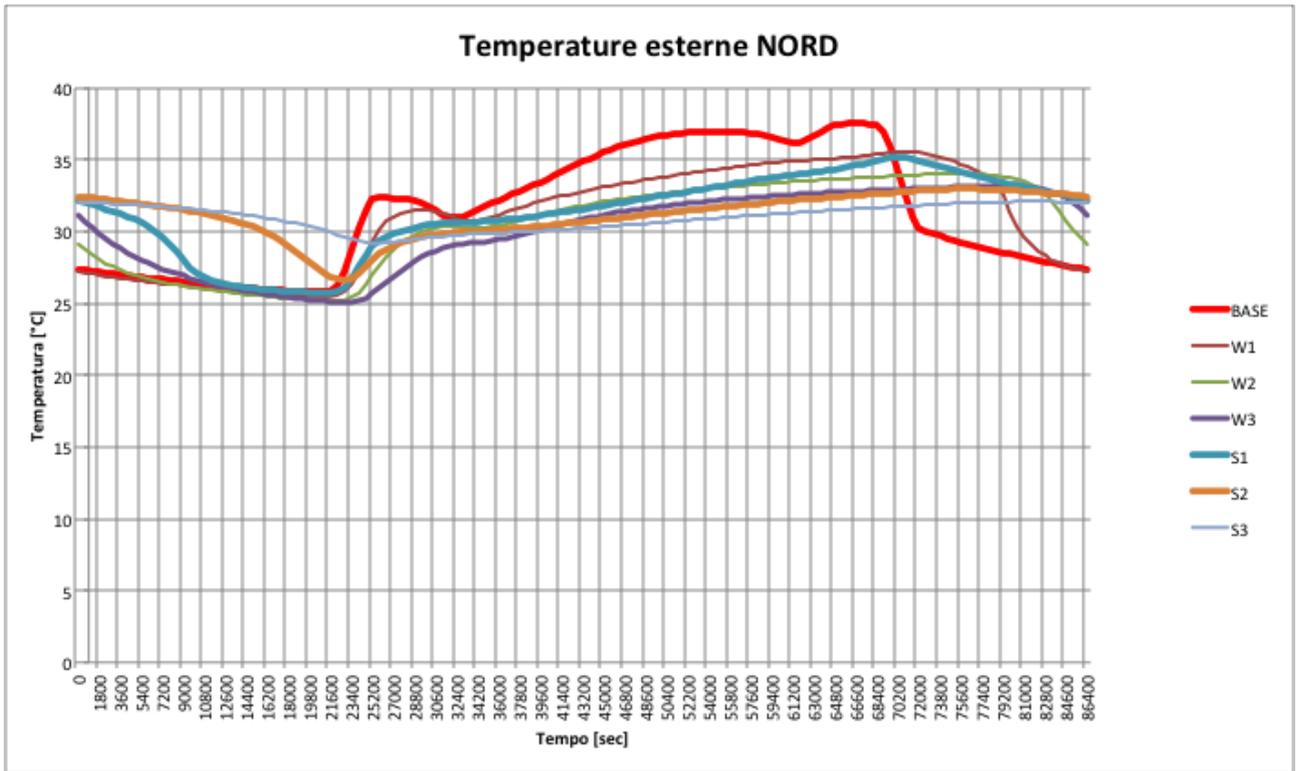




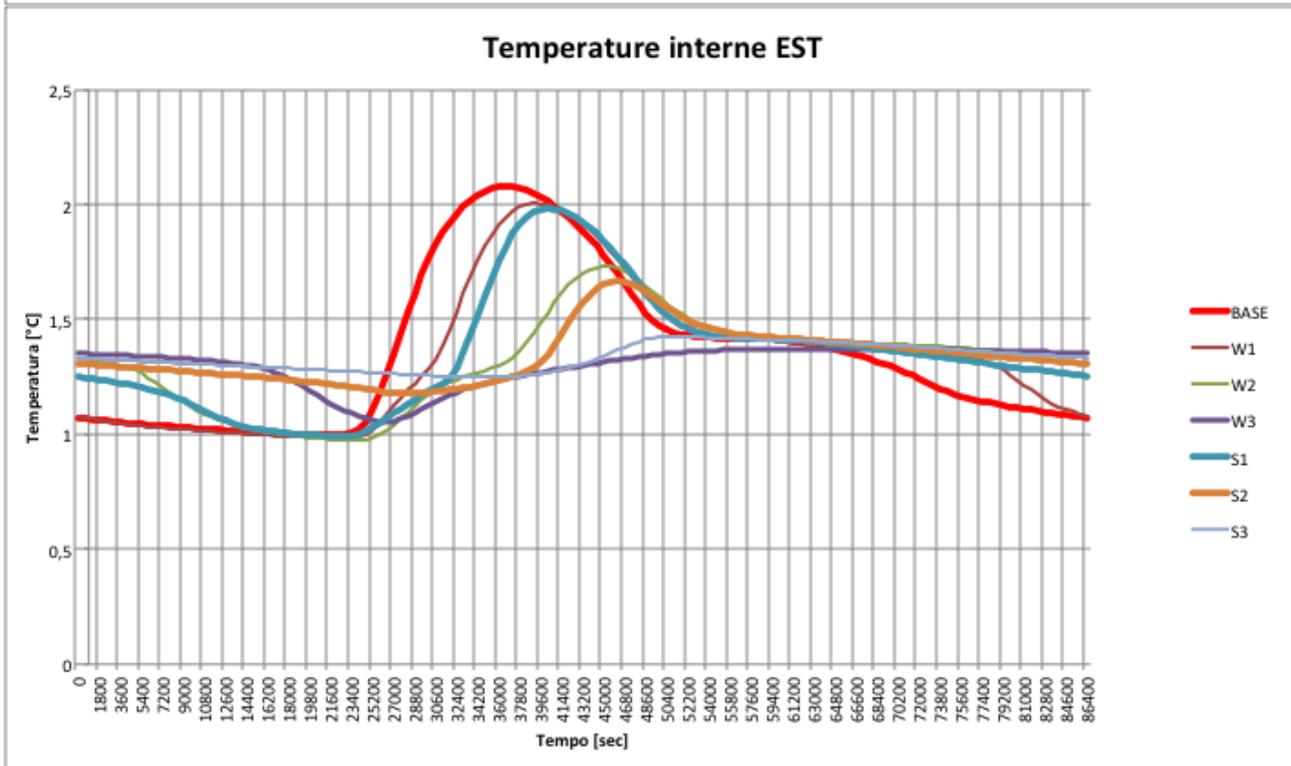
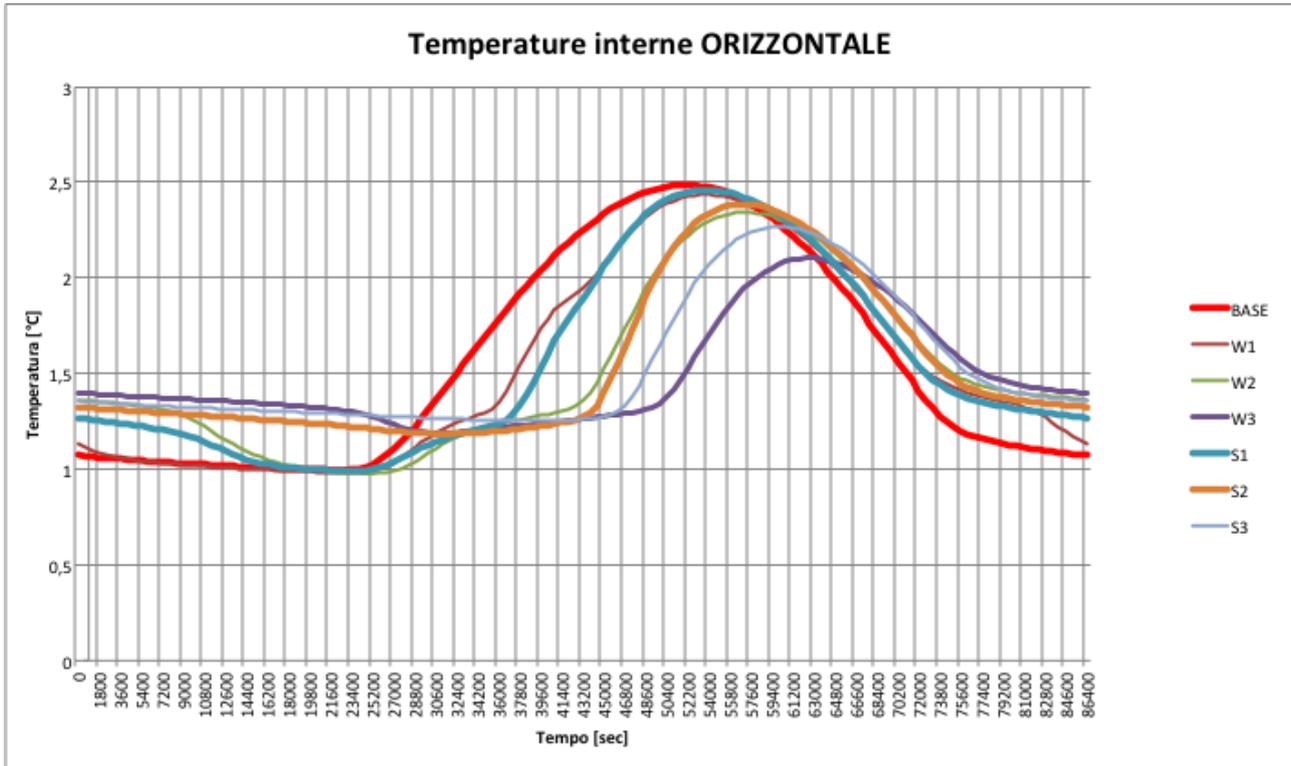
CONFRONTI: TEMPERATURA SUPERFICIE ESTERNA SANDWICH

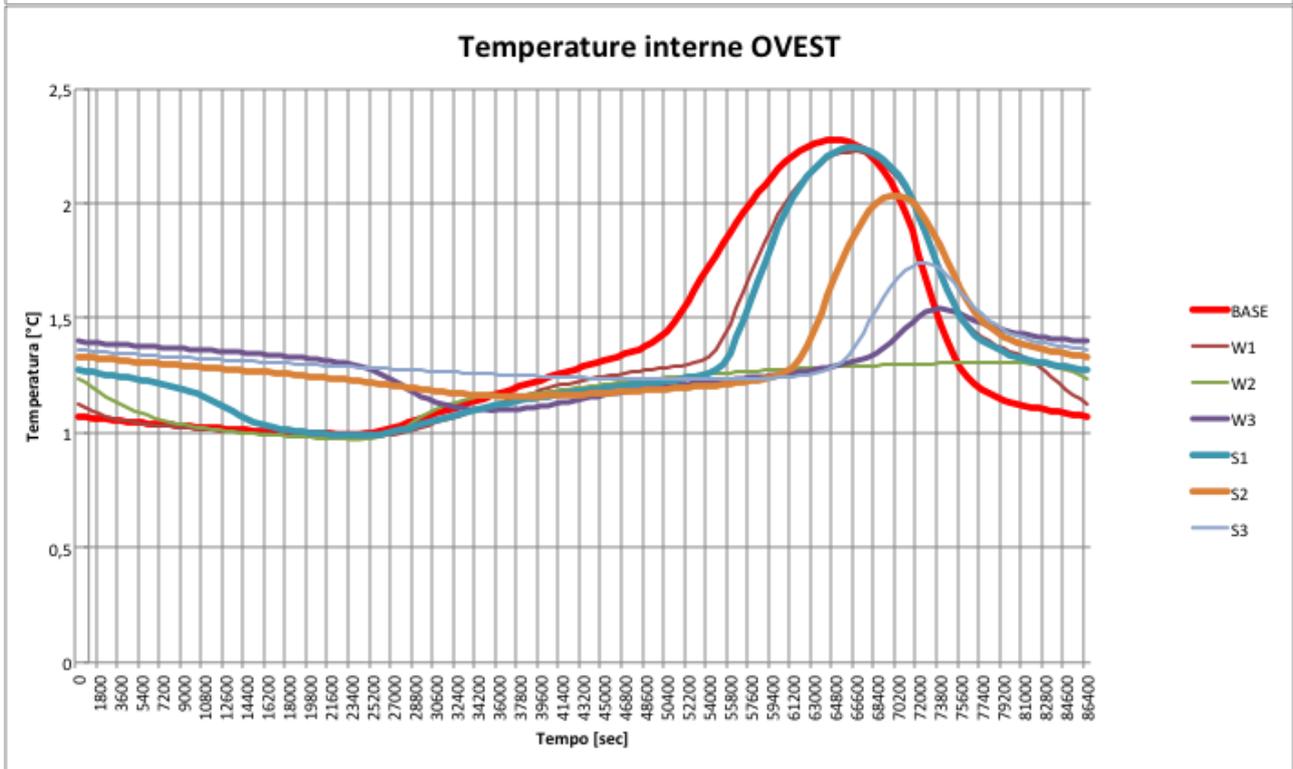
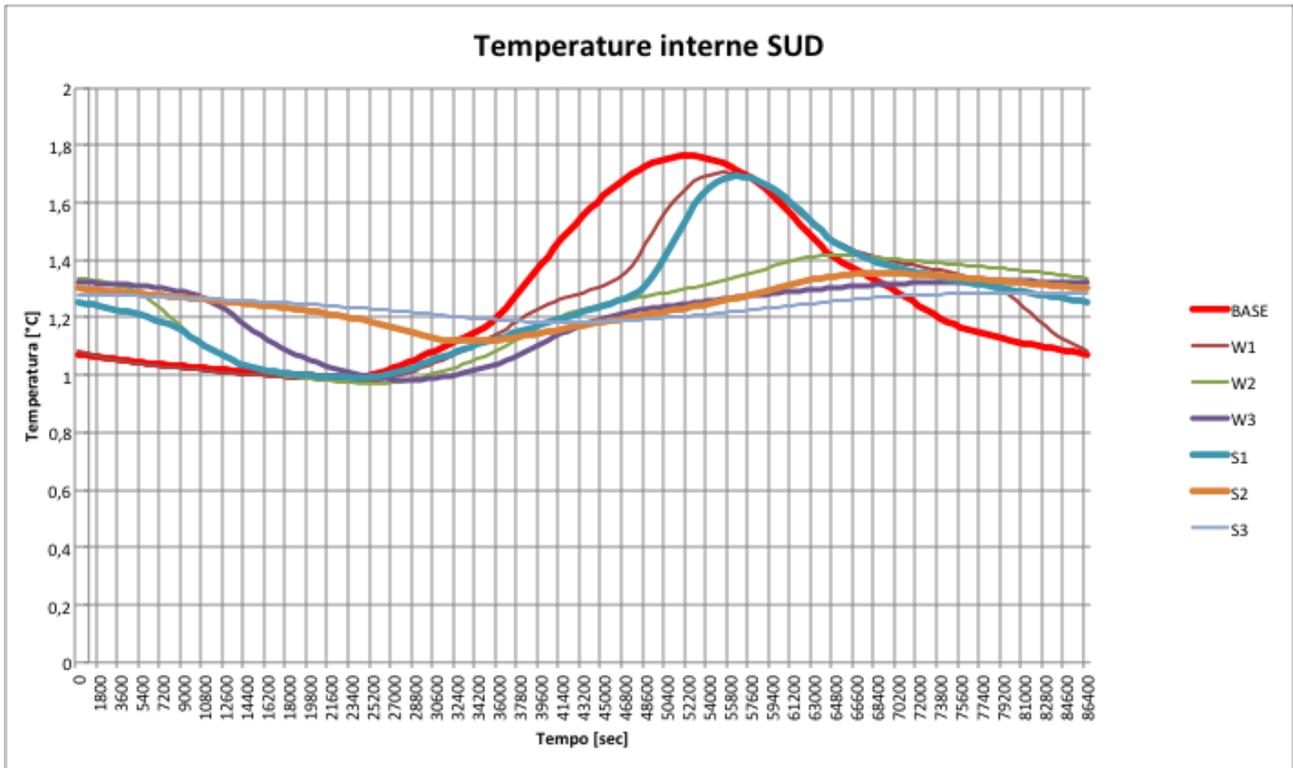


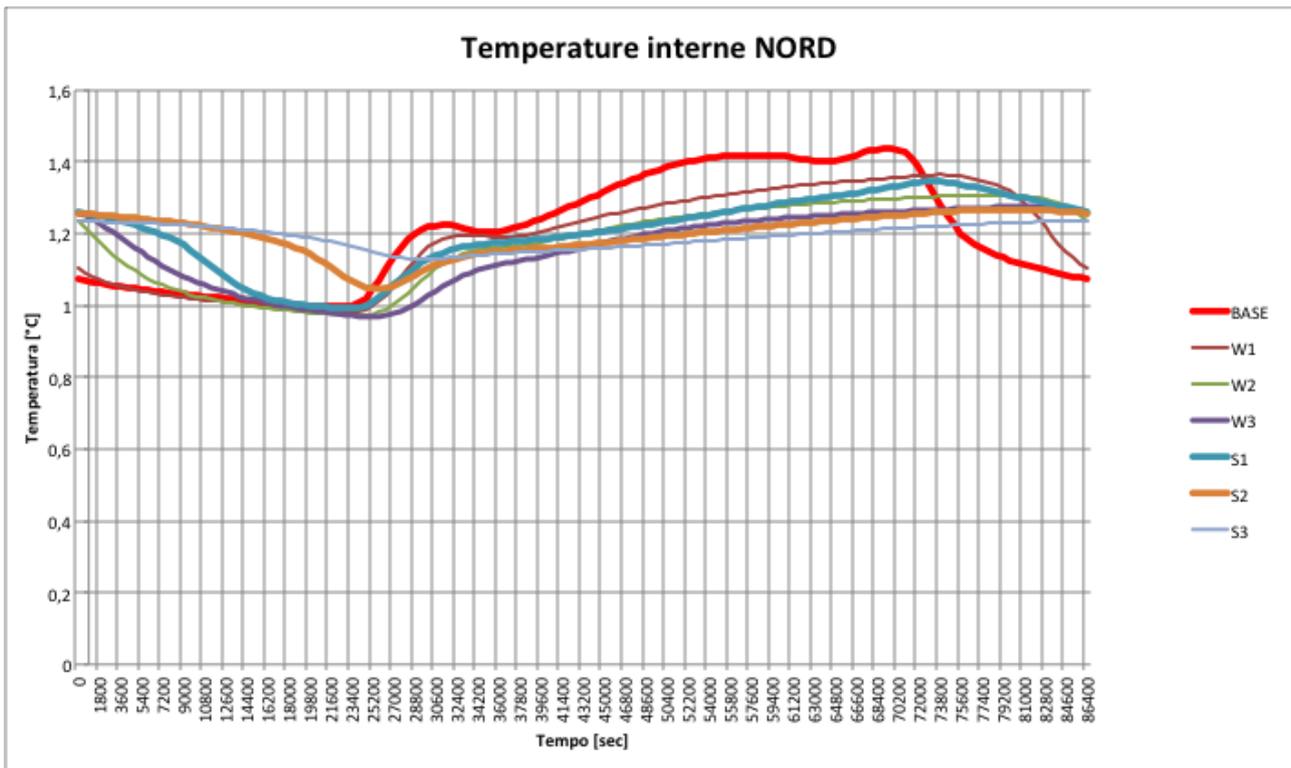




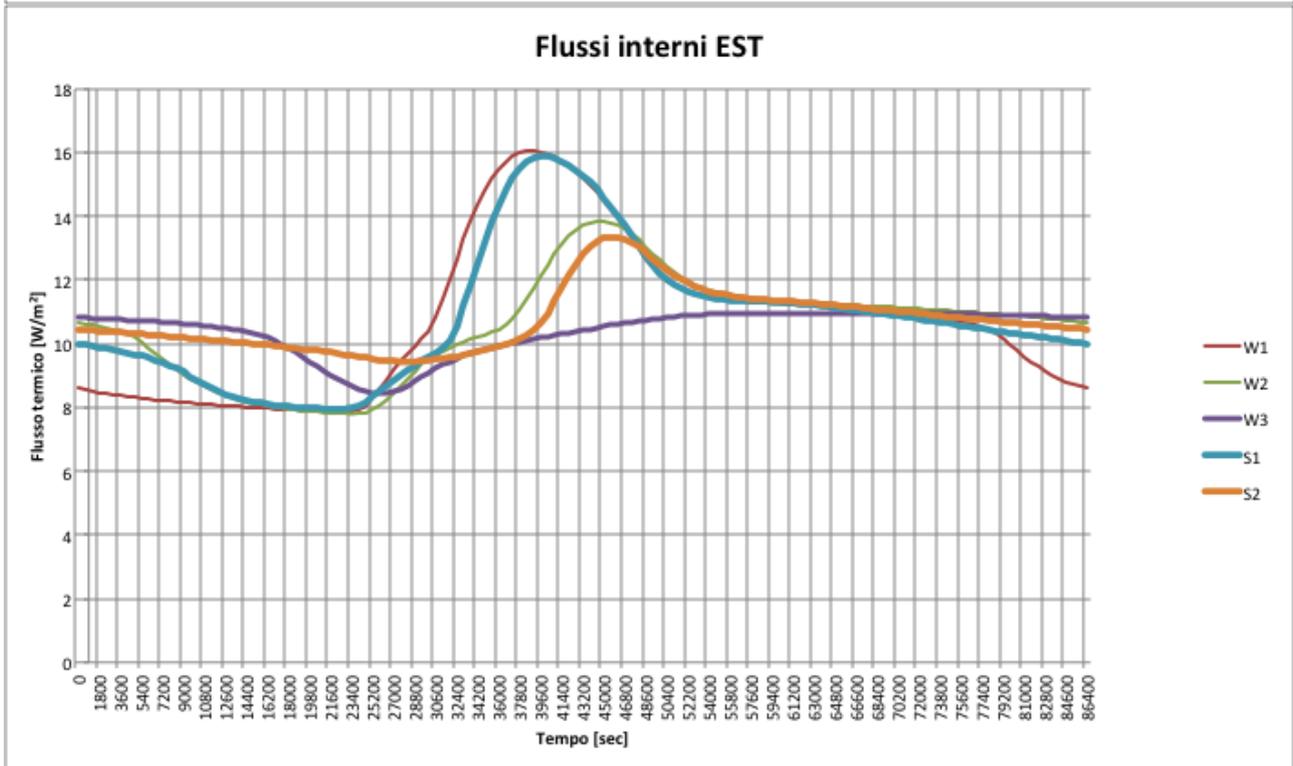
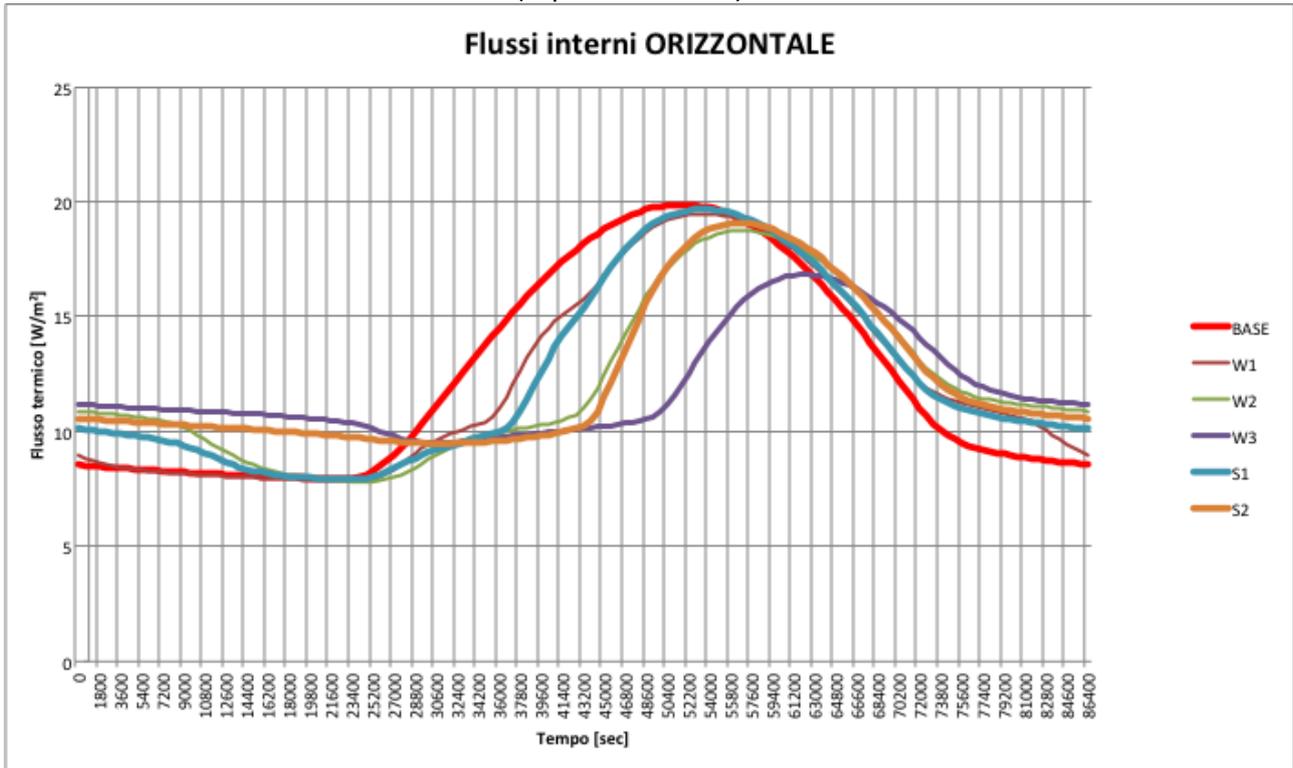
CONFRONTI: TEMPERATURA SUPERFICIE INTERNA



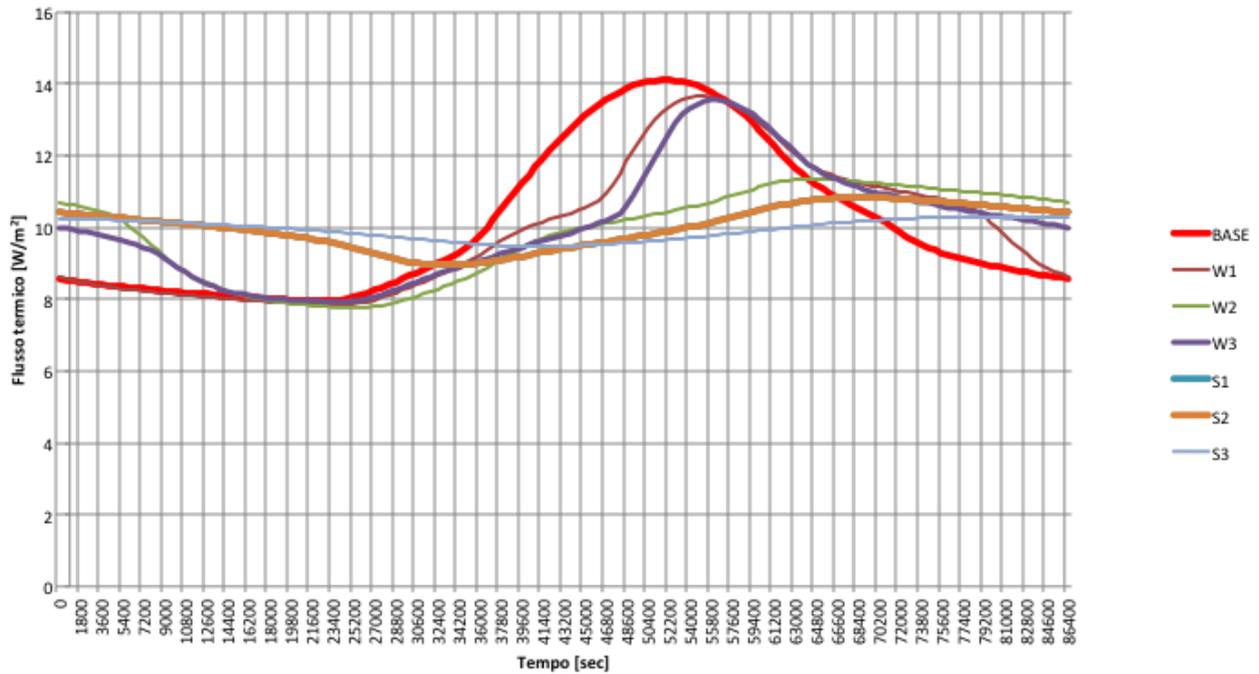




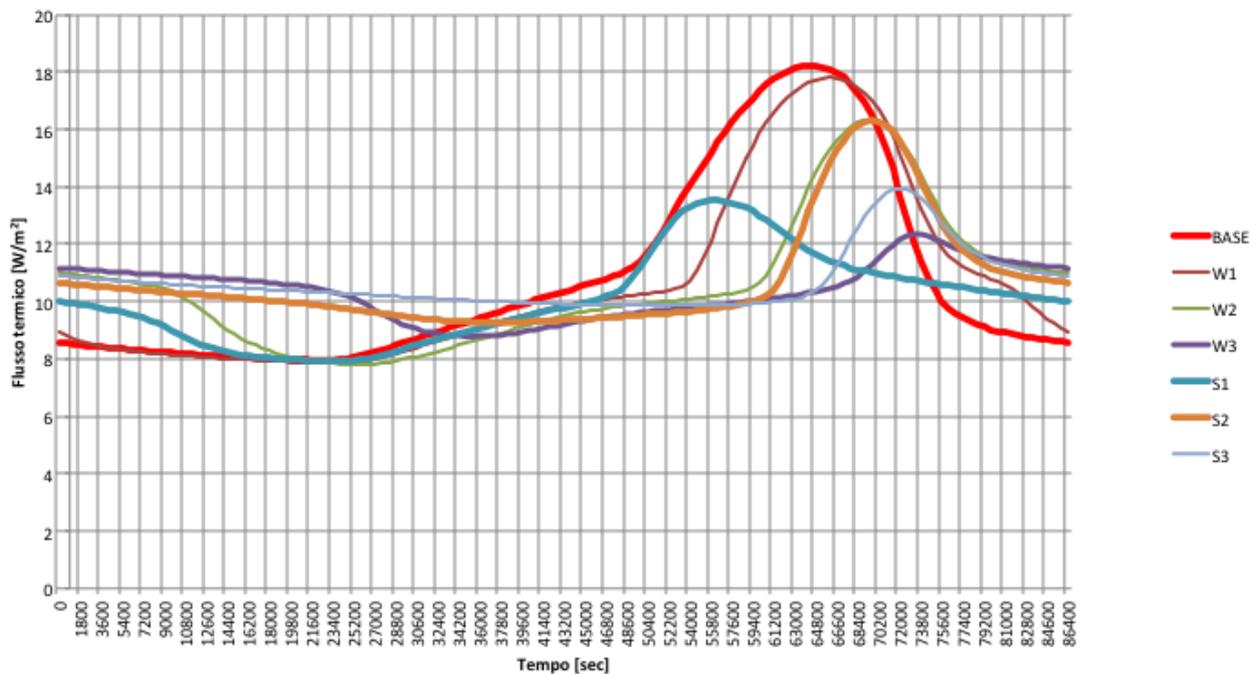
CONFRONTI: FLUSSO TERMICO ENTRANTE (superficie interna)

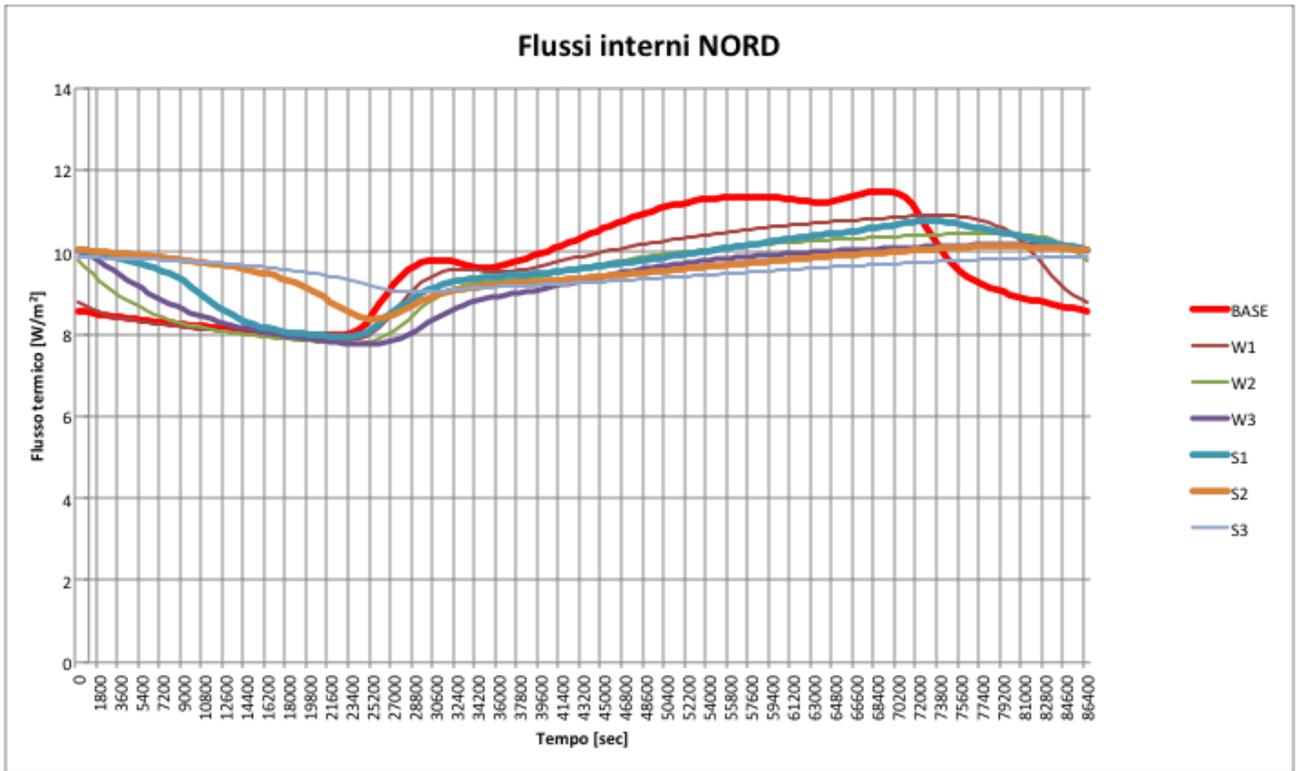


### Flussi interni SUD

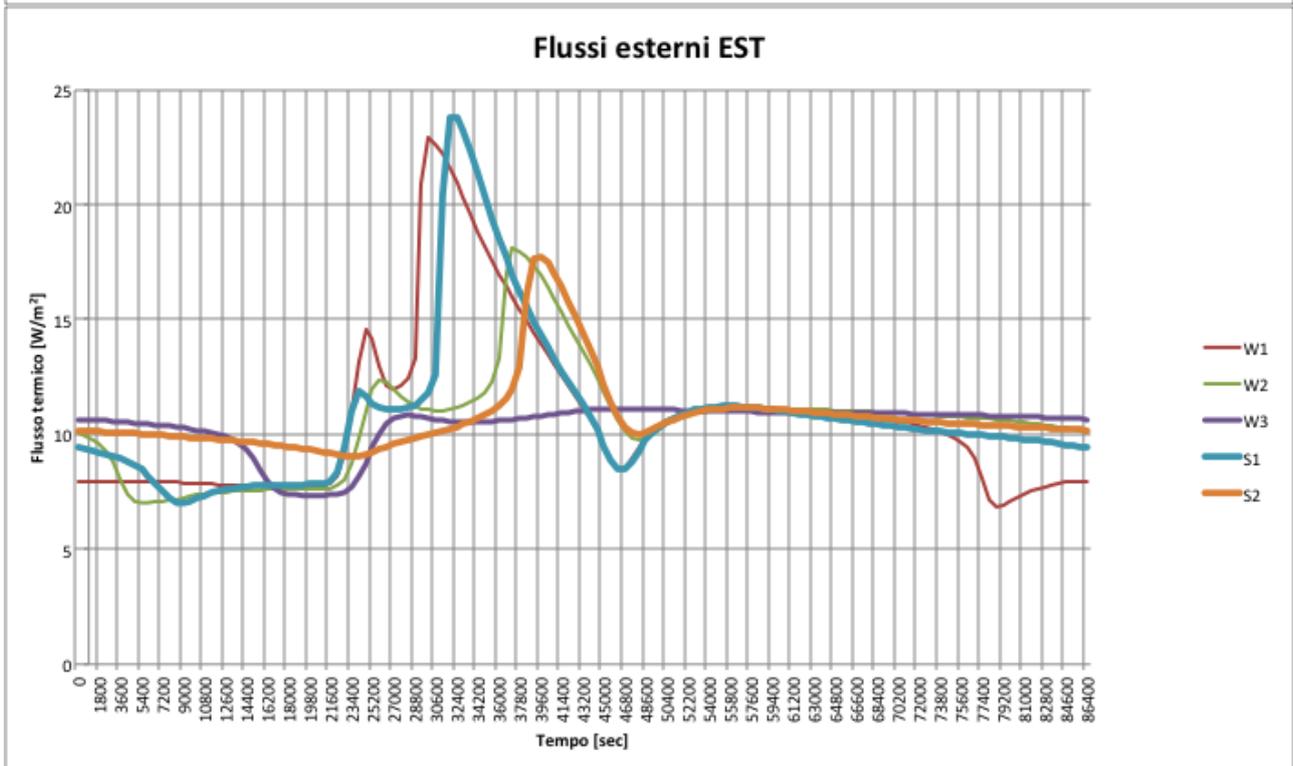
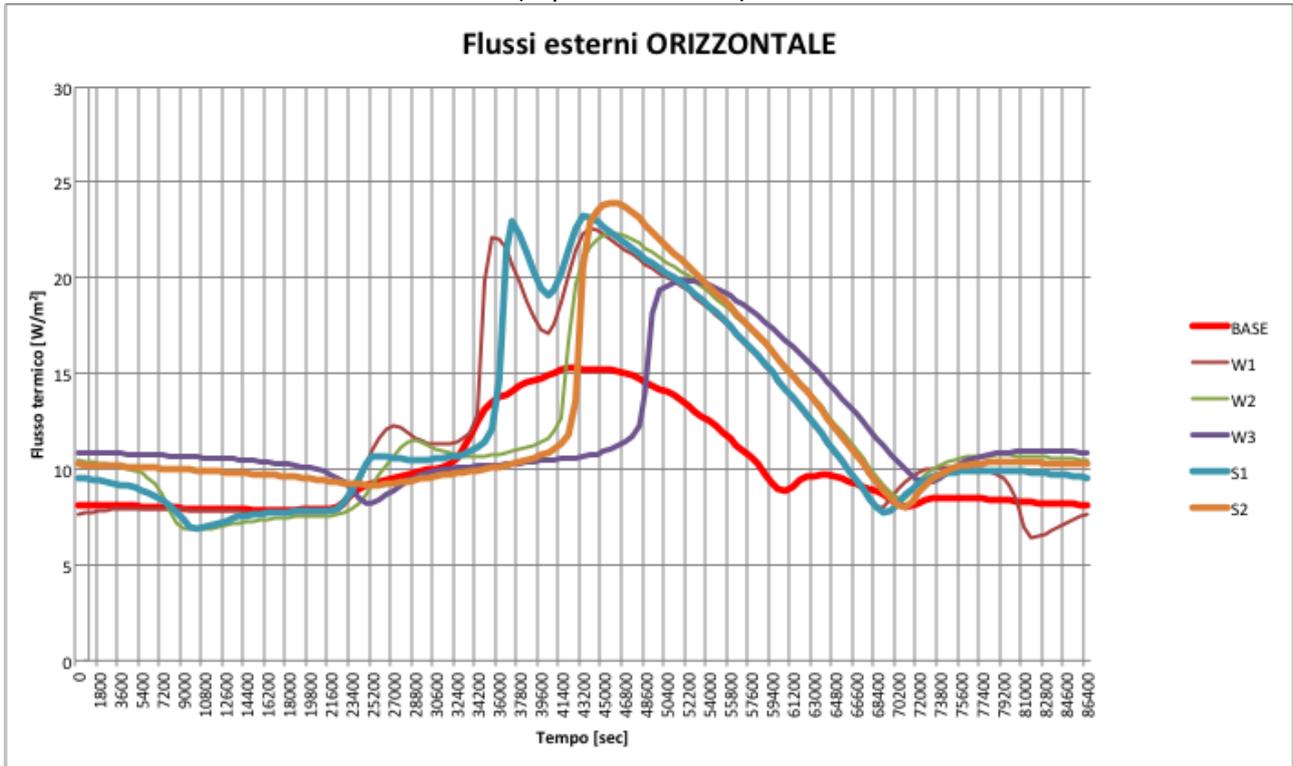


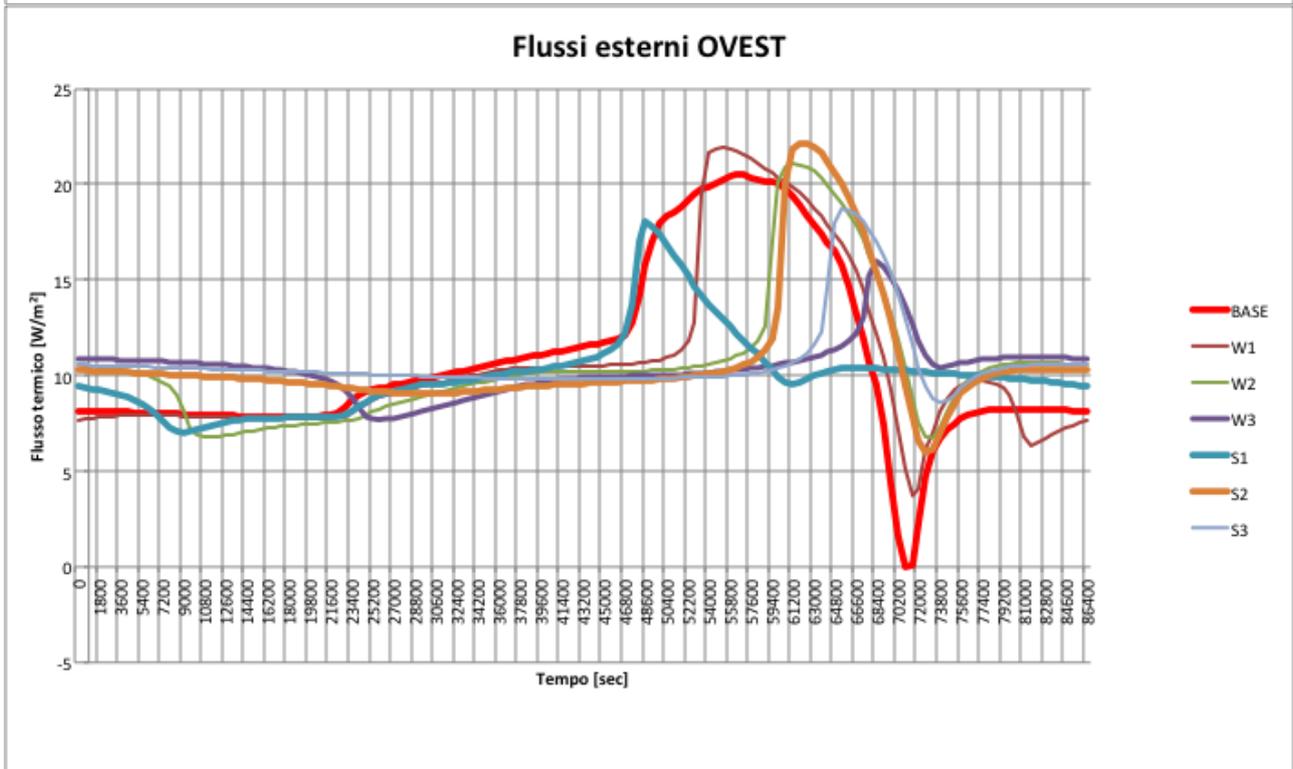
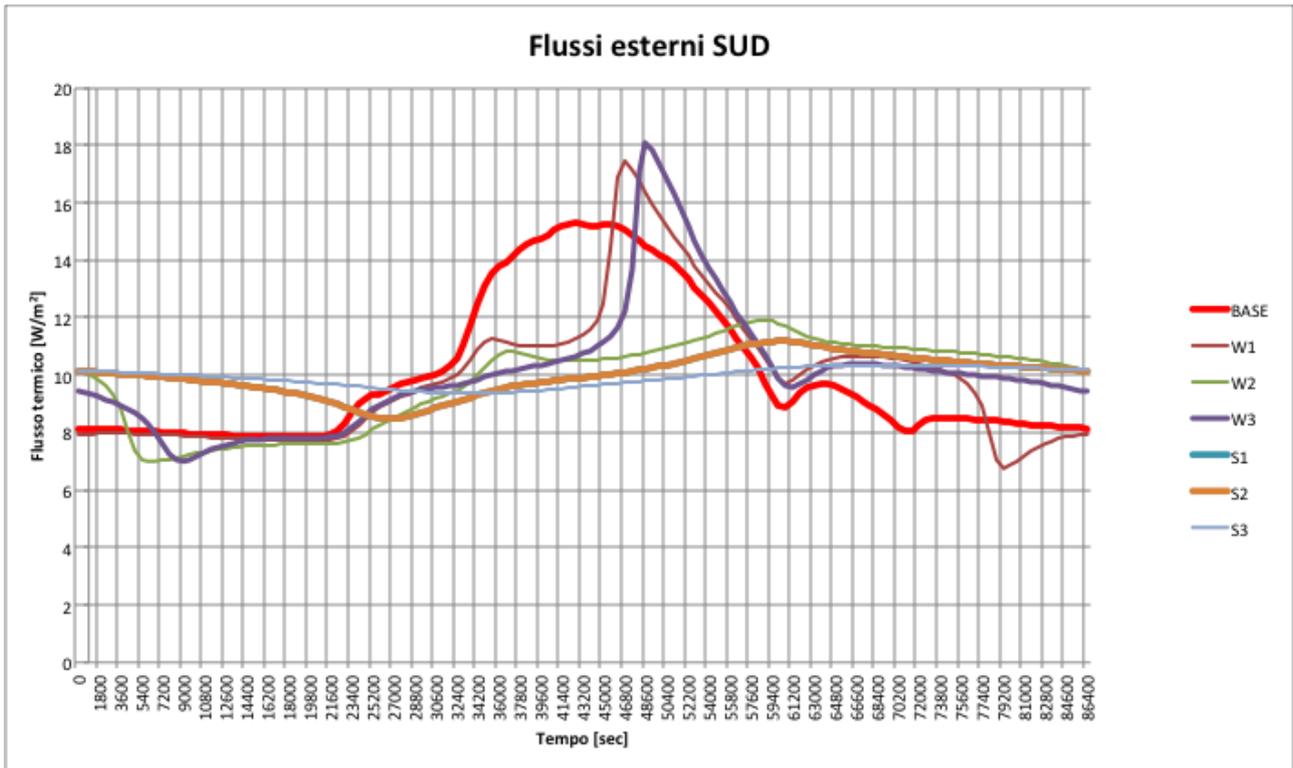
### Flussi interni OVEST

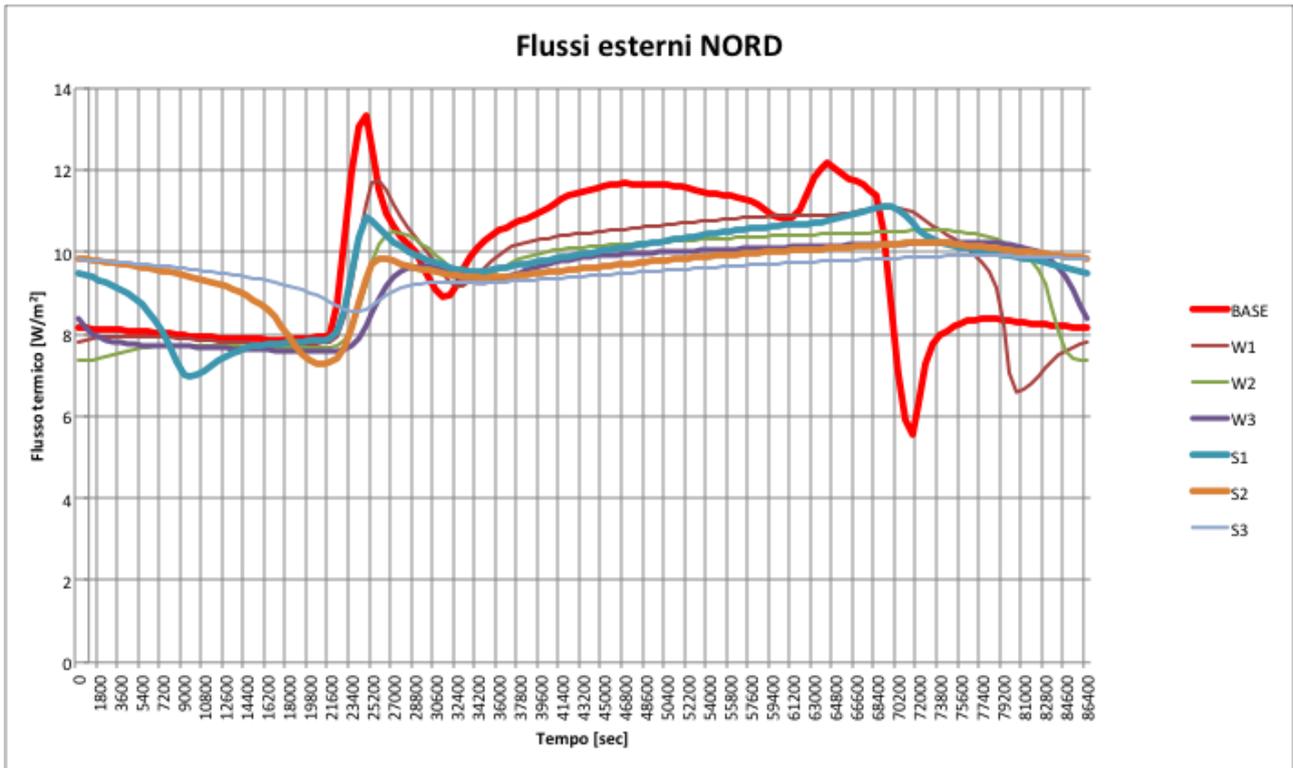




CONFRONTI: FLUSSO TERMICO ENTRANTE (superficie esterna)







#### 2.4.2 Analisi sperimentale

L'analisi sperimentale ha consentito di valutare l'effetto del PCM in un modulo frigorifero sotto le azioni climatiche reali estive di Ancona. Le valutazioni sono state fatte per confronto tra il modulo con PCM in copertura e uno identico dove questo strato non è stato applicato.

Nelle quattro settimane sono stati rilevati i flussi termici entranti attraverso la copertura e le temperature sui diversi strati e dell'aria interna, e su questi parametri sono stati fatti i confronti.

Durante la prima settimana è stato fatto un confronto a climatizzatore spento, per verificare l'effetto senza l'intervento dell'impianto, mentre nelle settimane successive l'impianto di climatizzazione è stato acceso e impostato a una temperatura di 0°C.

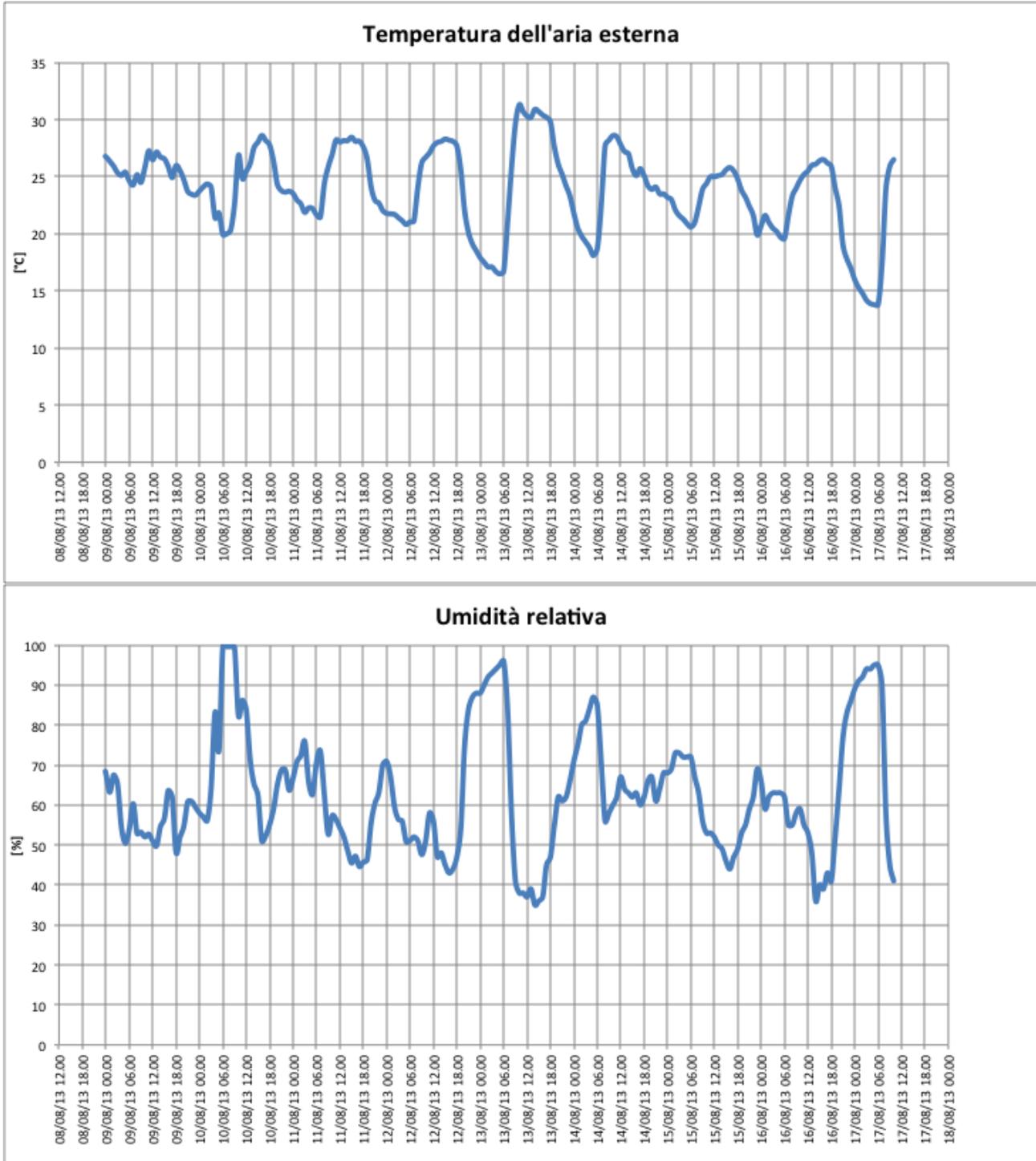
Sia nella condizione attiva che passiva, non si sono notate significative variazioni dovute all'applicazione di PCM delle temperature dell'aria interna, anche in funzione della limitata estensione dello strato di PCM rispetto all'intera superficie dell'involucro.

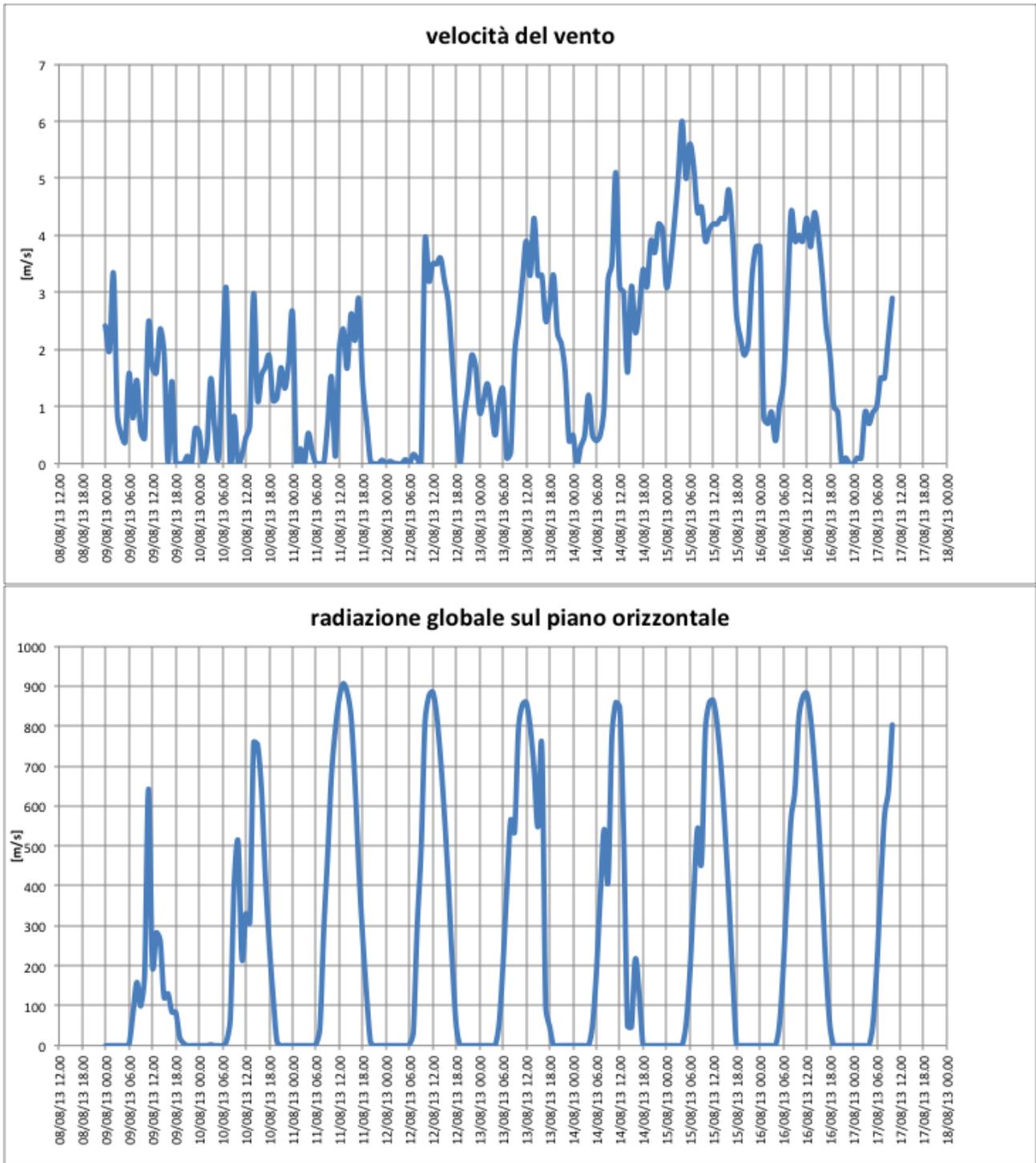
Ciò che si nota, sia in termini di temperature che di flussi, è che il PCM ha stabilizzato questi valori, non denotando però elevate capacità a ridurre i picchi massimi. Questo fenomeno deriva essenzialmente dalla limitata quantità di PCM inserita in copertura, non capace di assorbire tutti i flussi termici entranti, ma esaurendo la propria capacità già nelle prime ore di radiazione del giorno. Inoltre dai grafici delle temperature sopra e sotto lo strato di PCM ( $T_5-T_4$ ) è possibile vedere come queste in realtà, nella maggior parte delle ore del giorno coincidano. Questa coincidenza indica che a causa dell'enorme coefficiente di conducibilità termica dell'alluminio e l'importante spessore degli elementi, consentivano al flusso termico di passare lateralmente allo strato di PCM (con conducibilità bassa) e riscaldare la superficie della copertura della cella frigorifera.

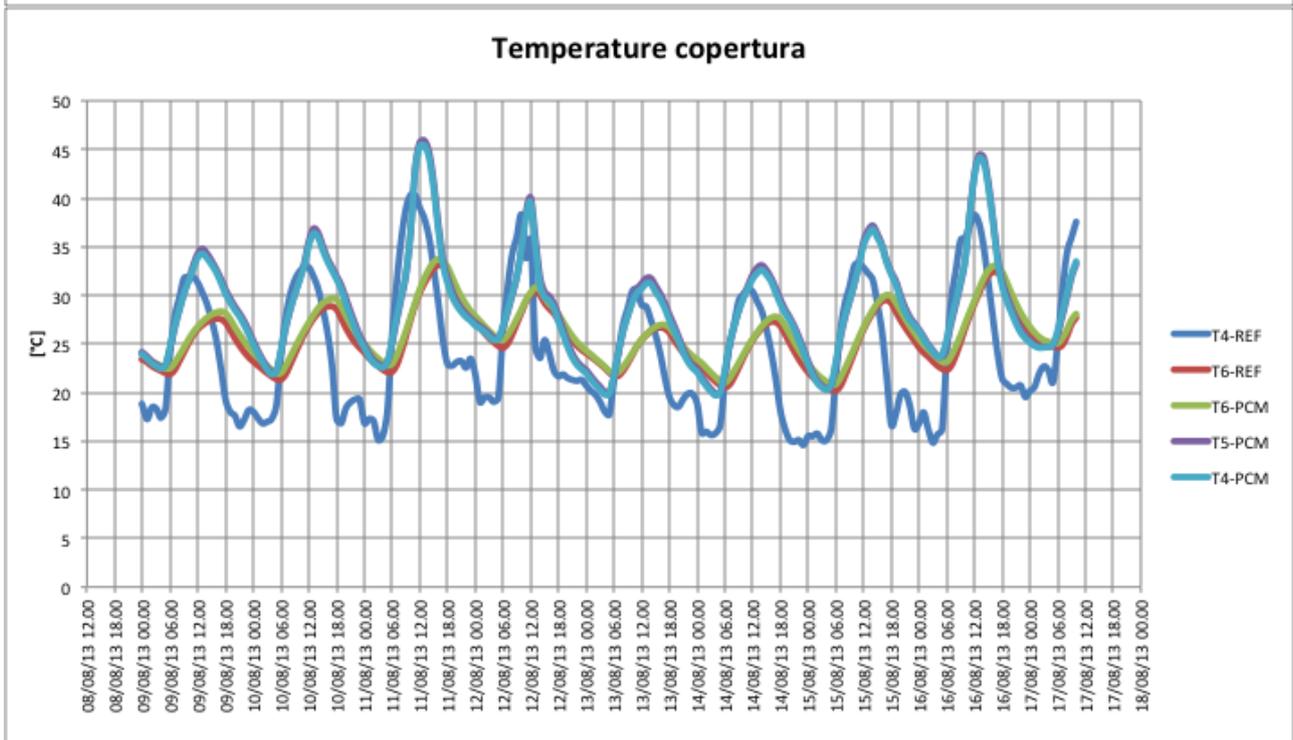
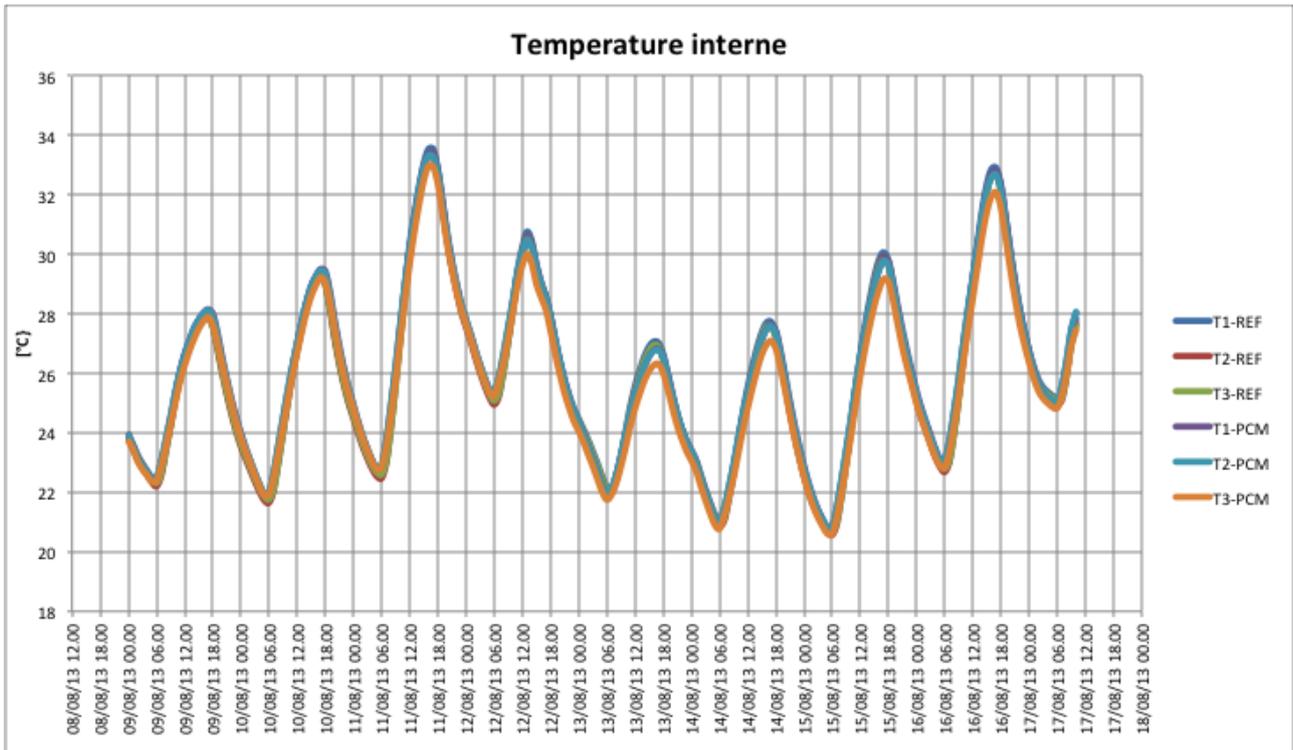
Da notare inoltre che i flussi termici risultano fortemente disturbati dall'impianto di climatizzazione, con oscillazioni eccessive che in alcuni casi rendono difficile l'interpretazione e la valutazione del contributo del PCM.

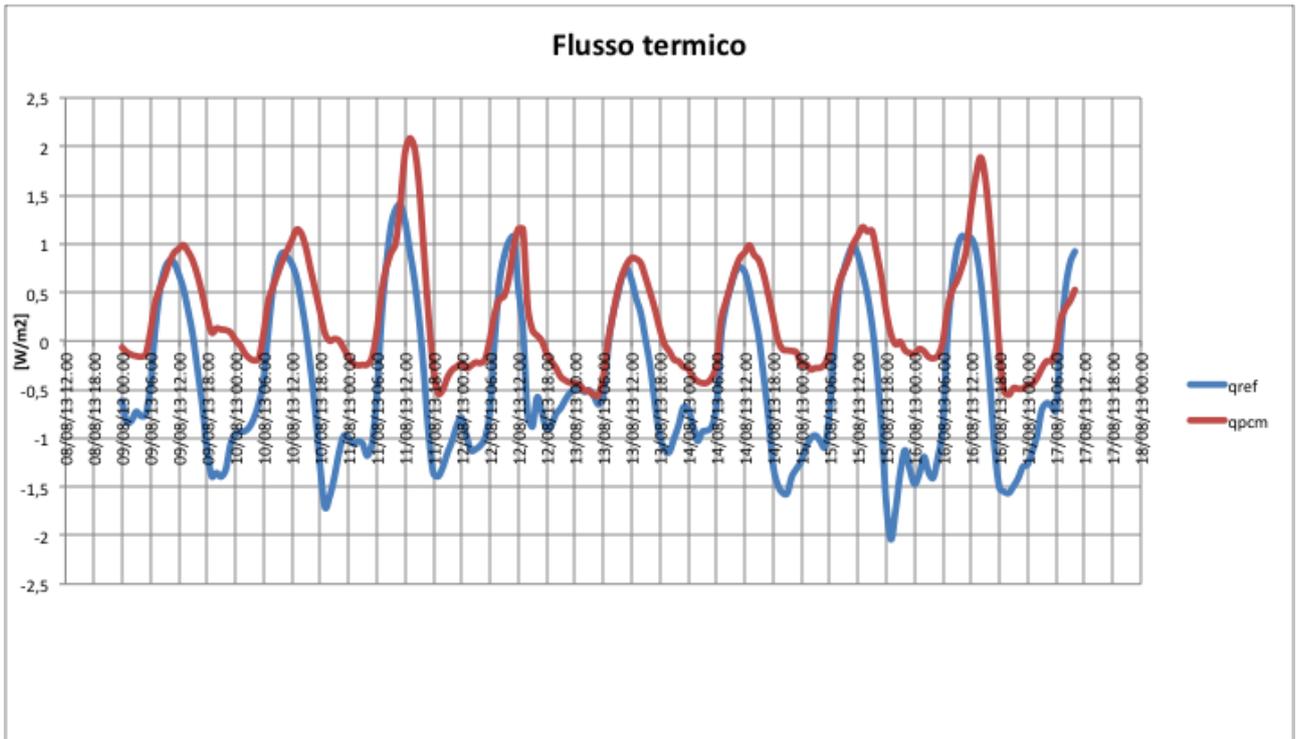
Importante effetto che si può notare dai grafici relativi ai flussi termici misurati è l'effetto di sfasamento temperatale apportato dai materiali cambiamento di fase.

**1°SETTIMANA – FUNZIONAMENTO PASSIVO A CONDIZIONATORE SPENTO**

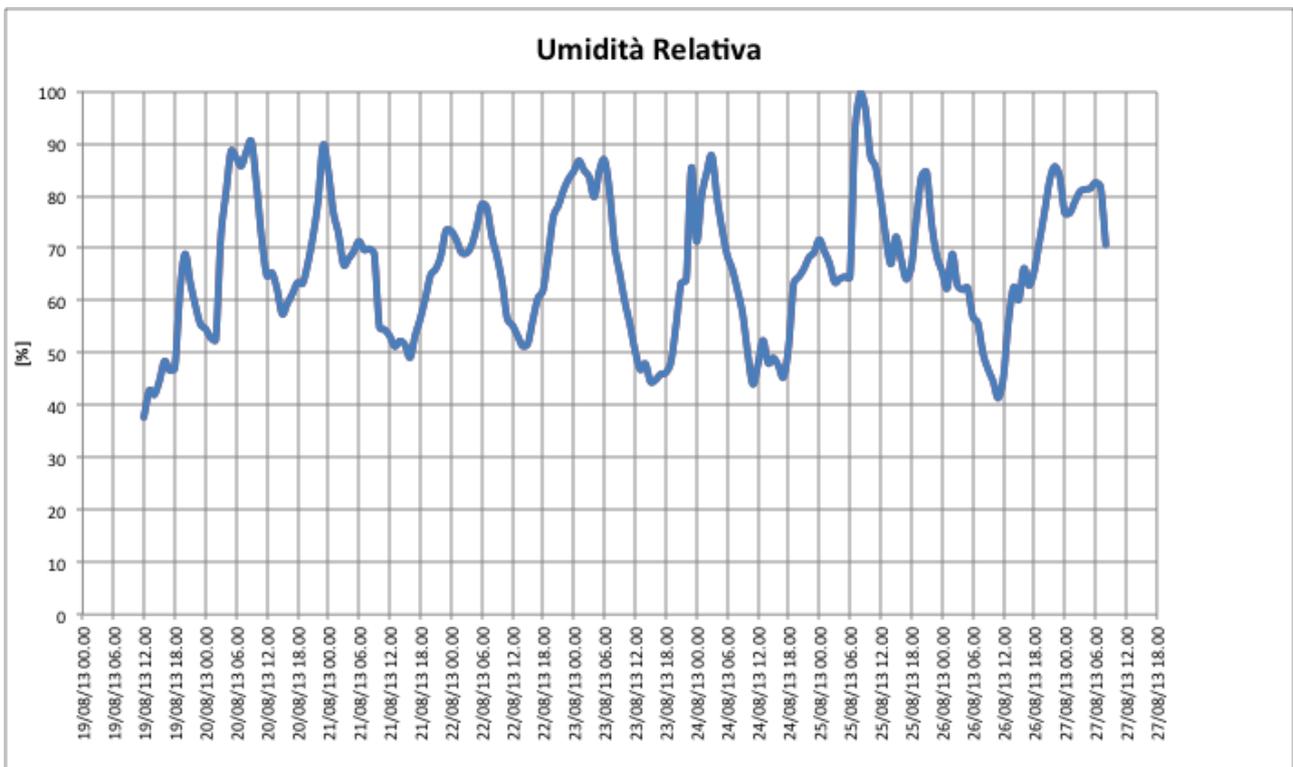
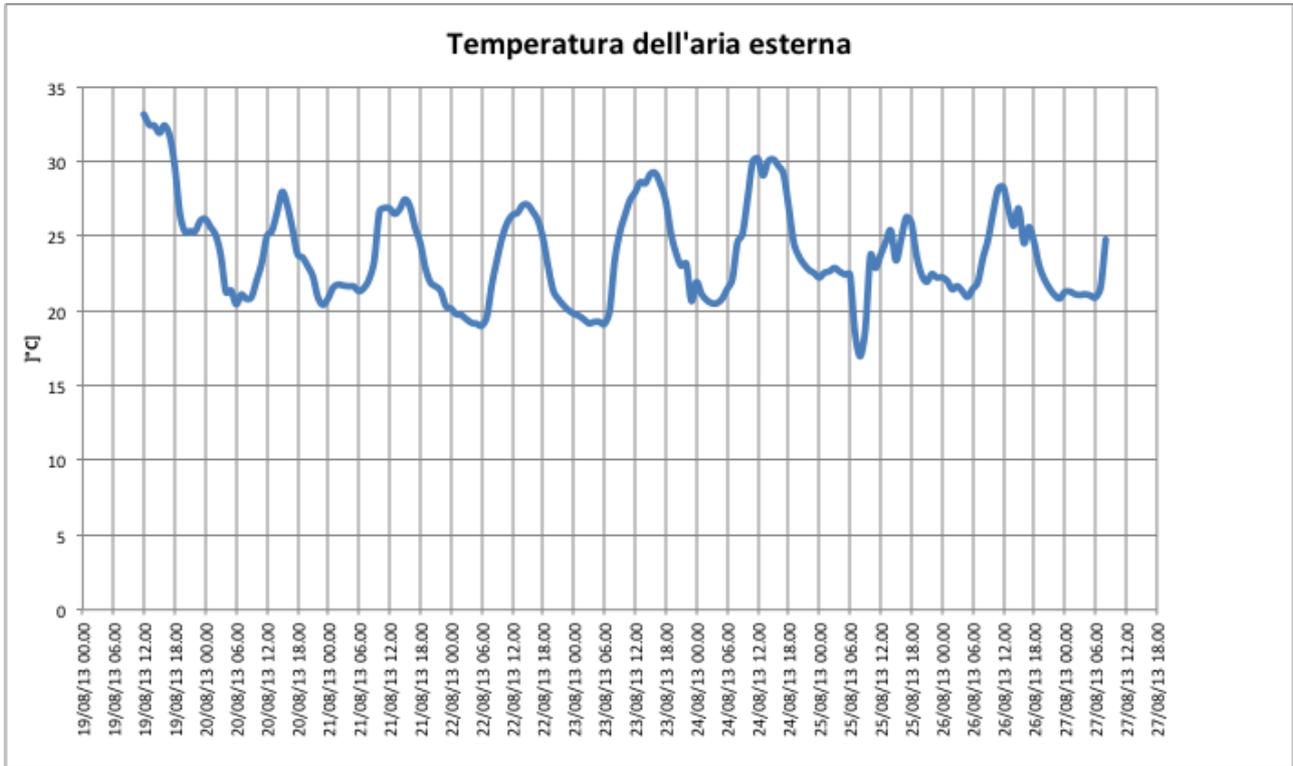


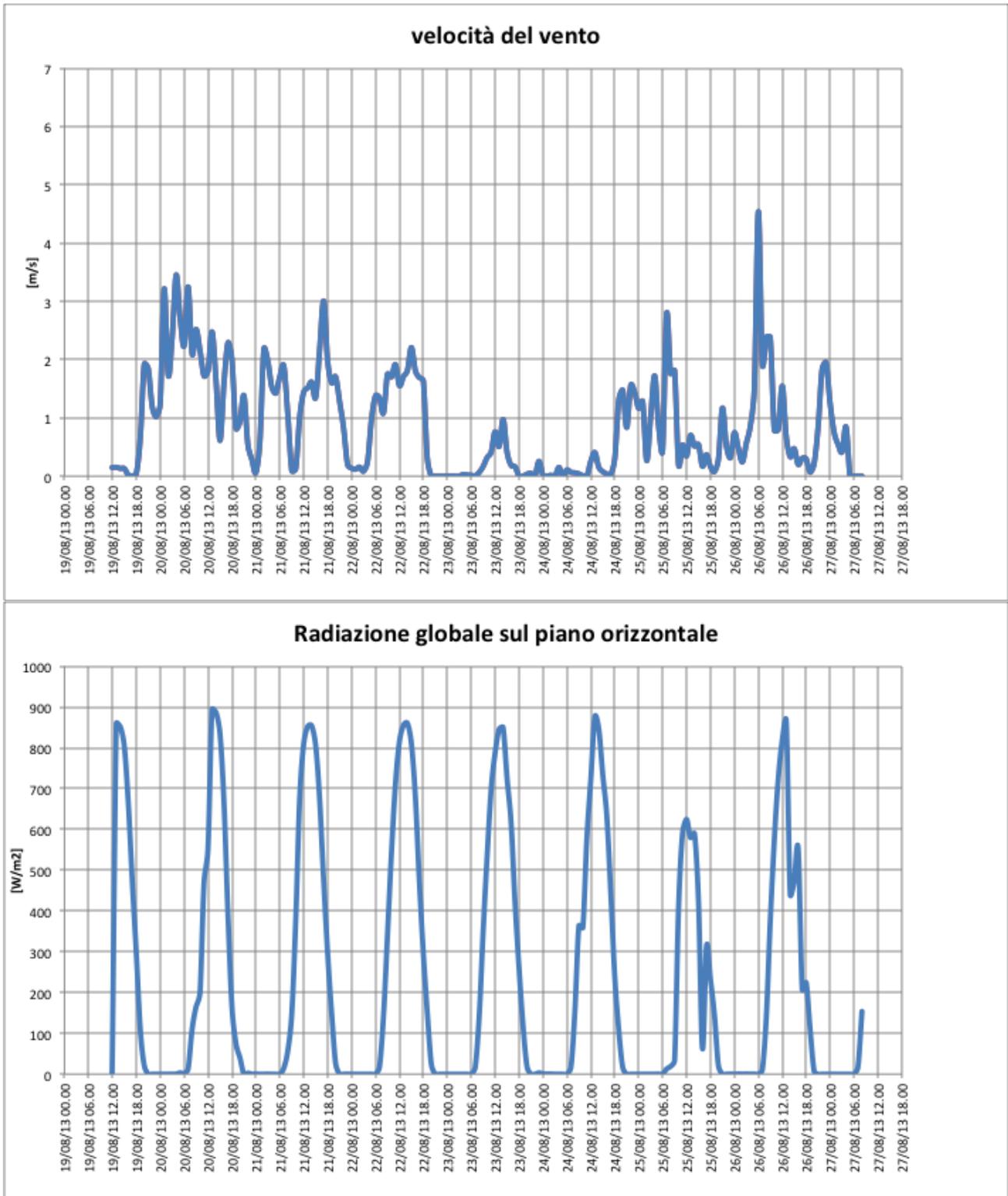


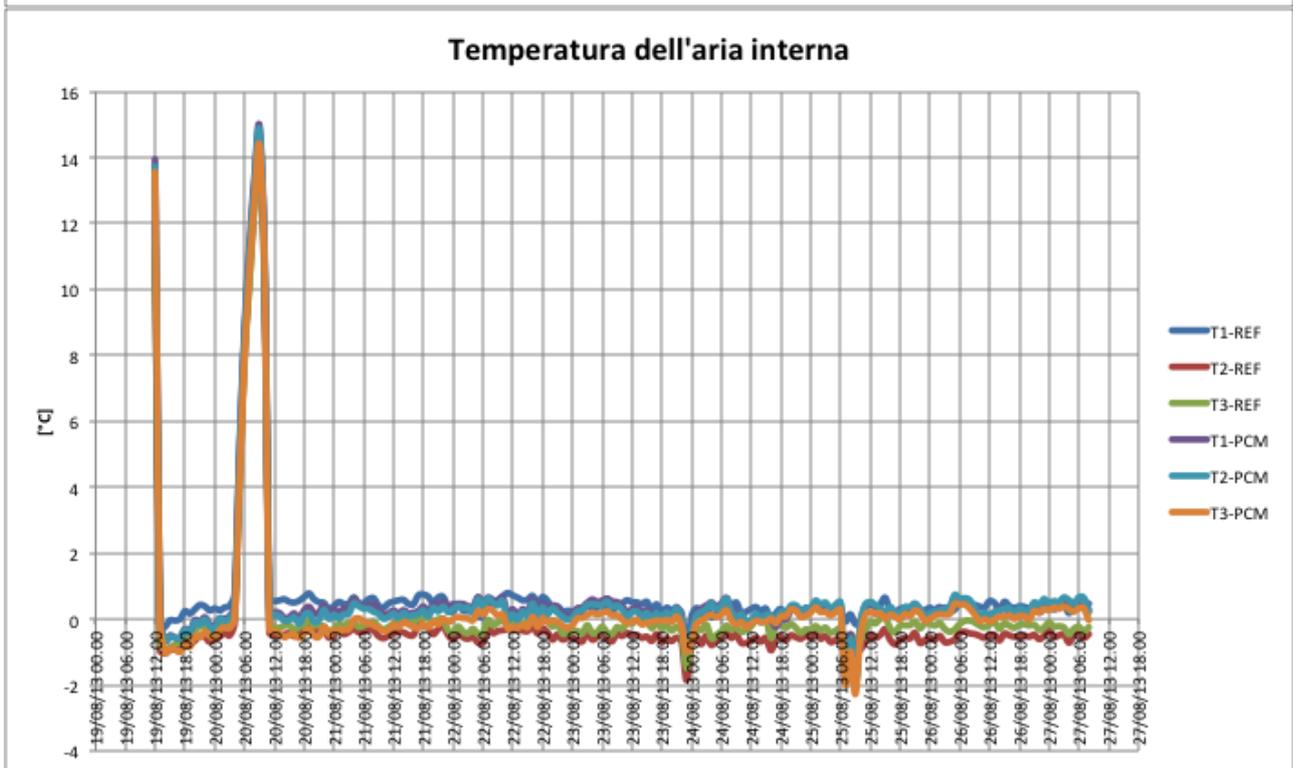
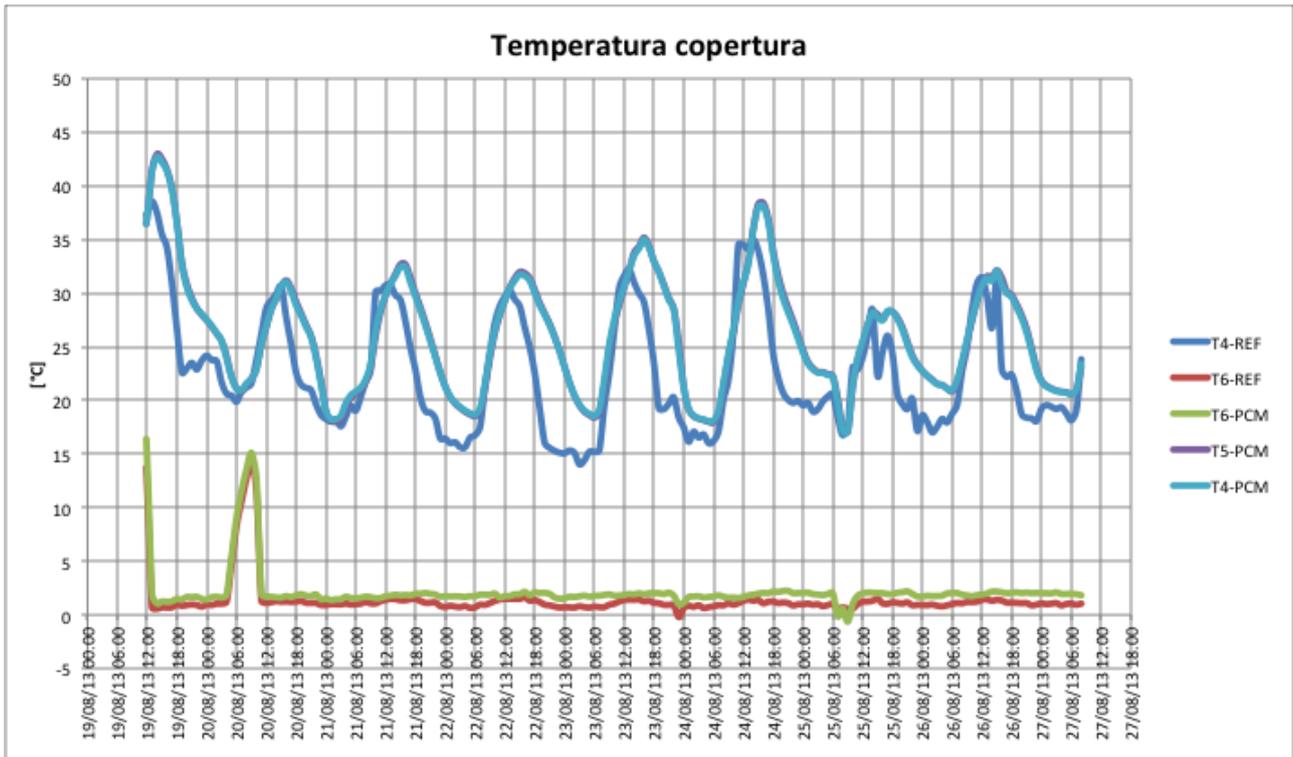


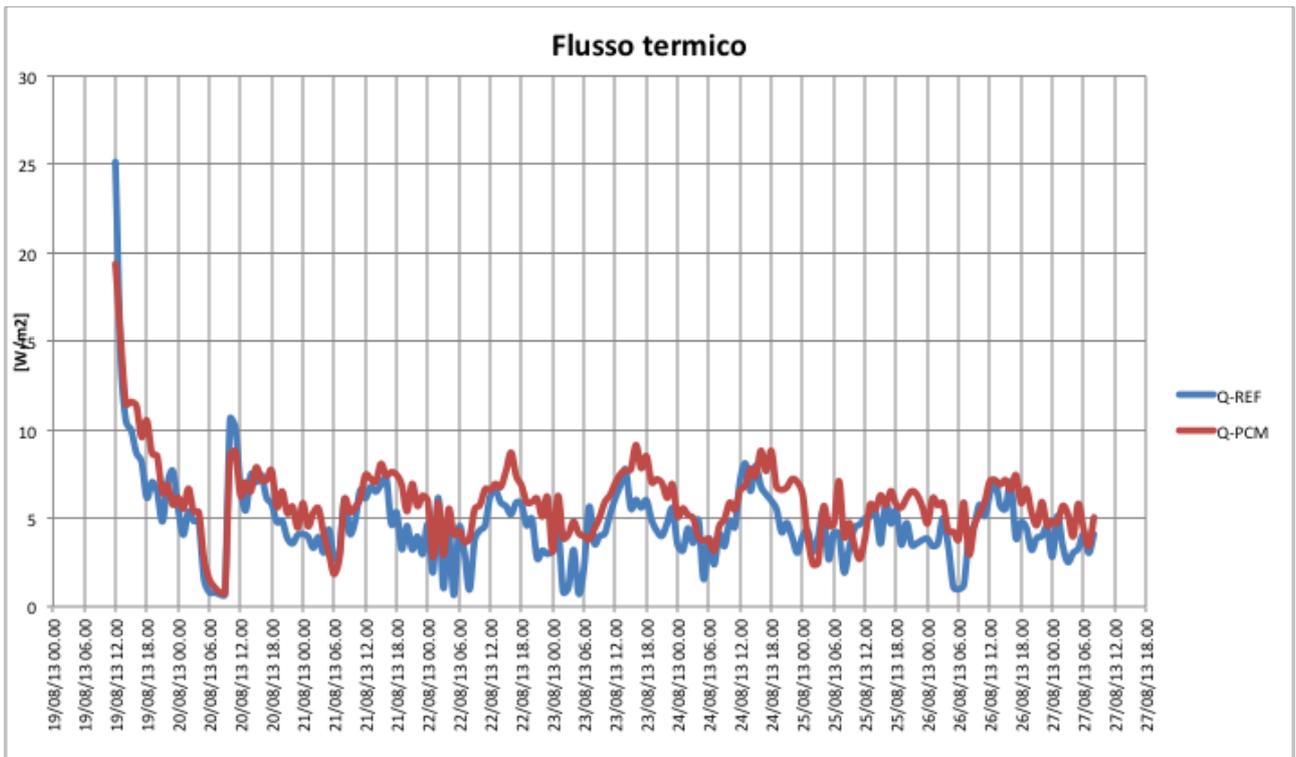


**2° SETTIMANA – IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE IMPOSTATO A 0°**

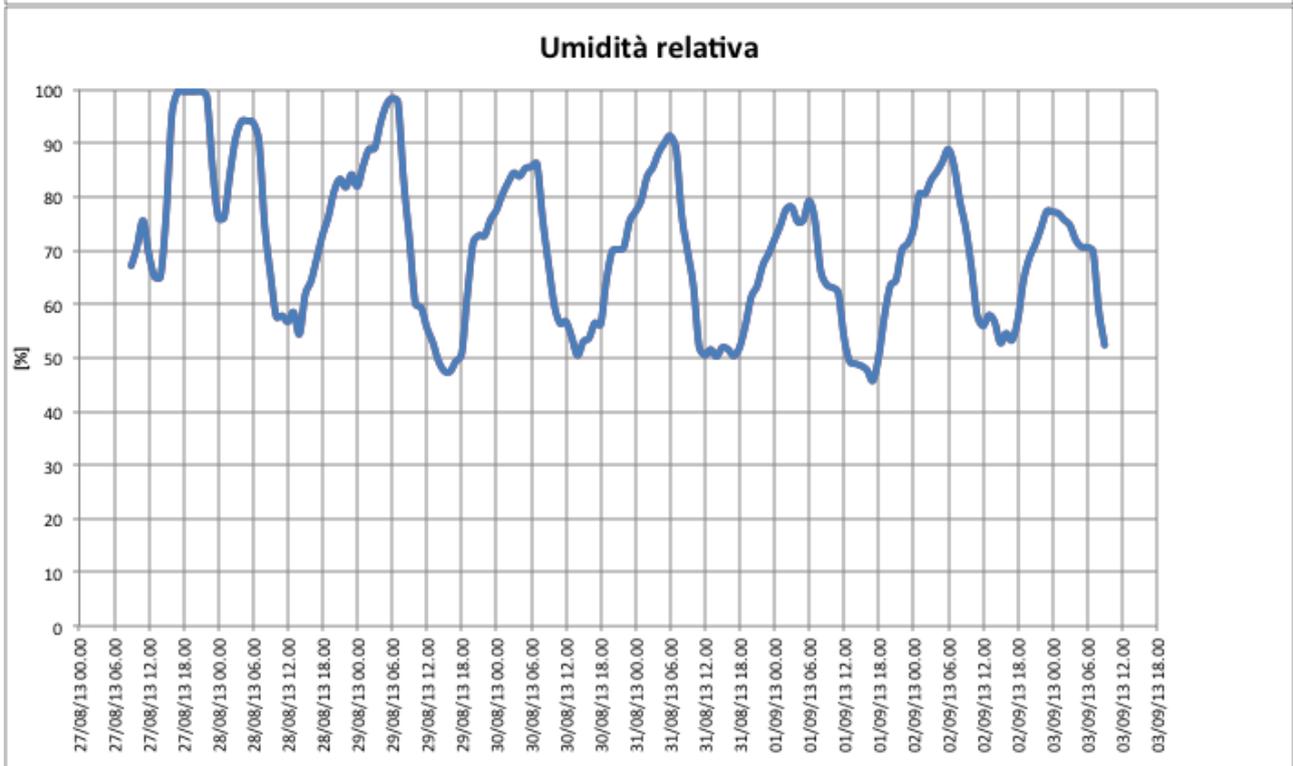
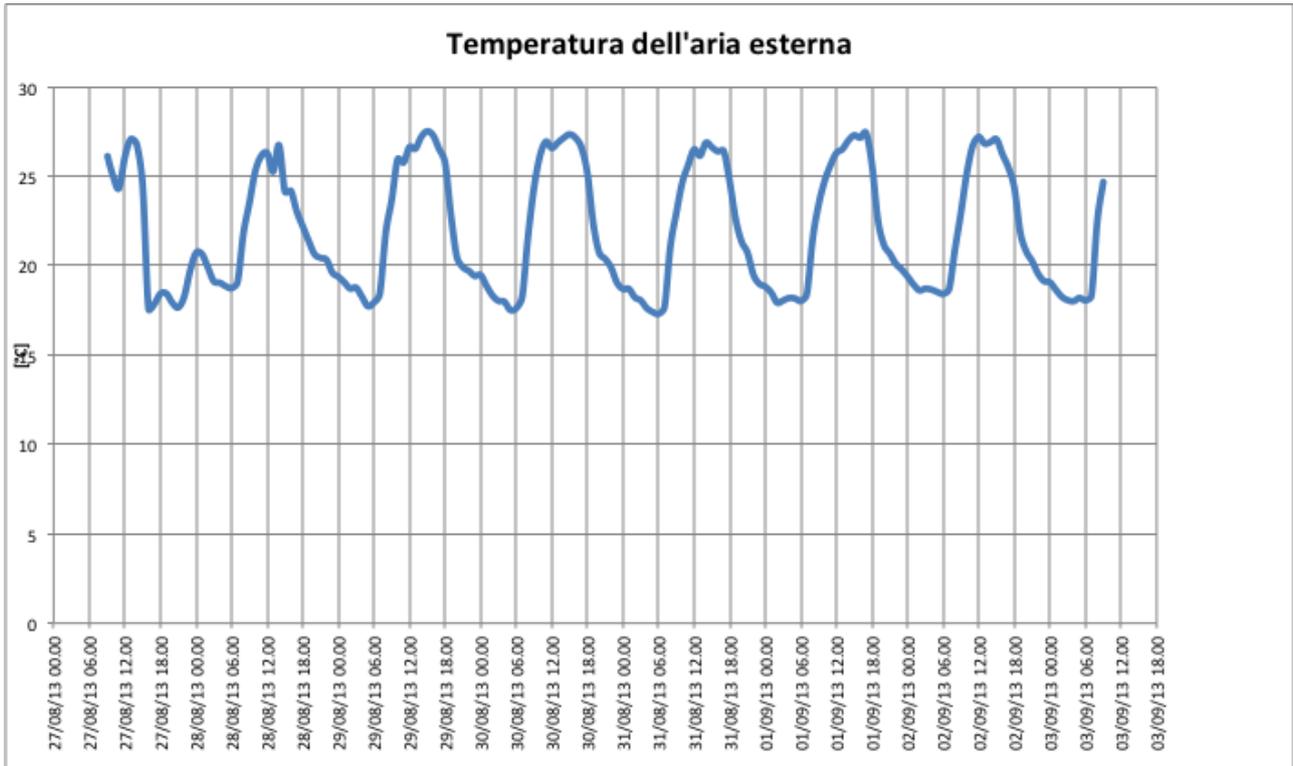


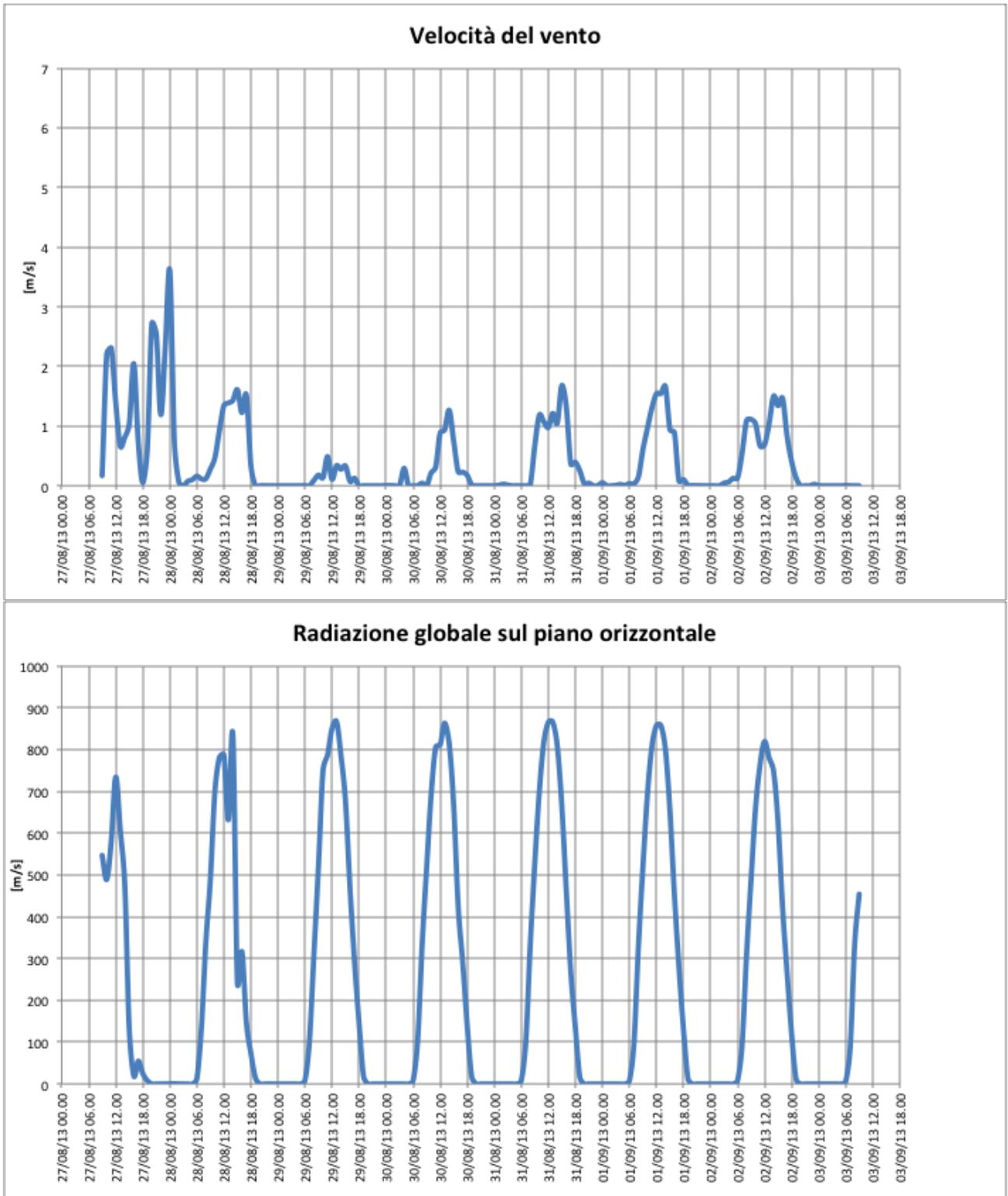


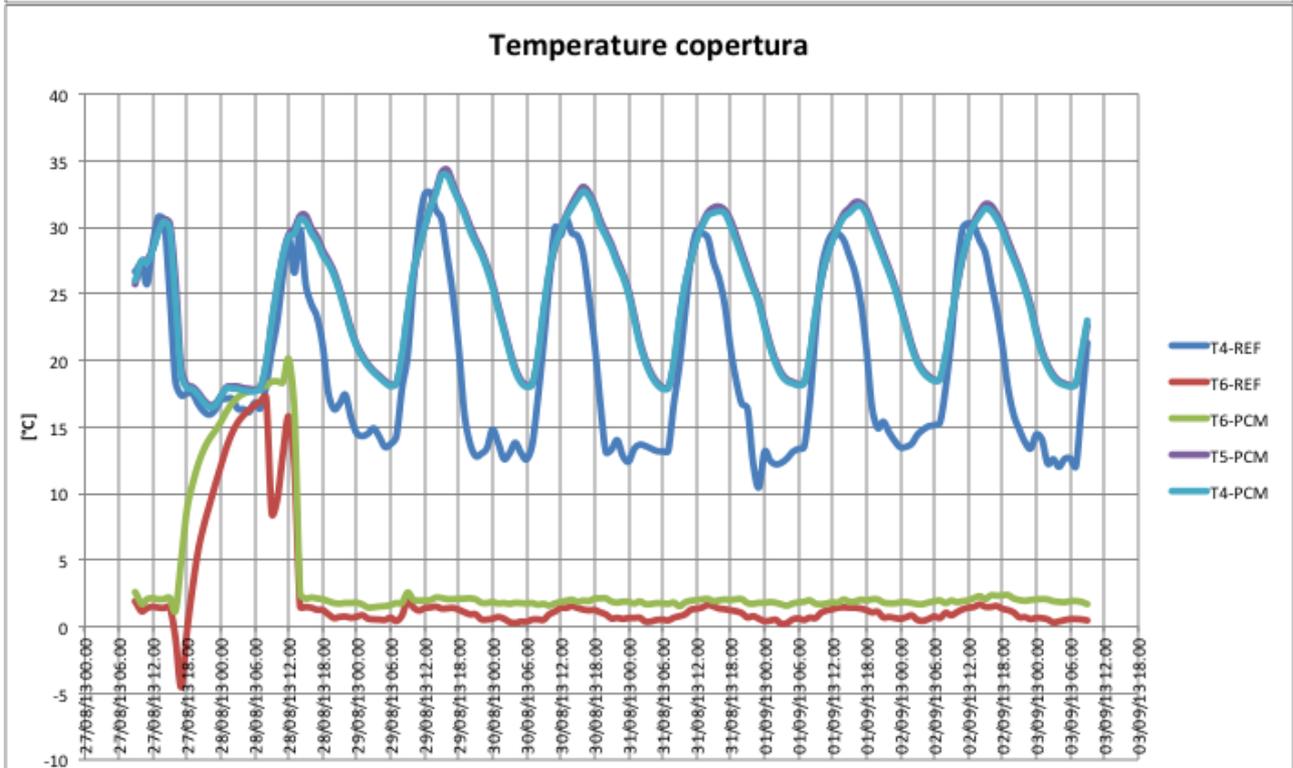
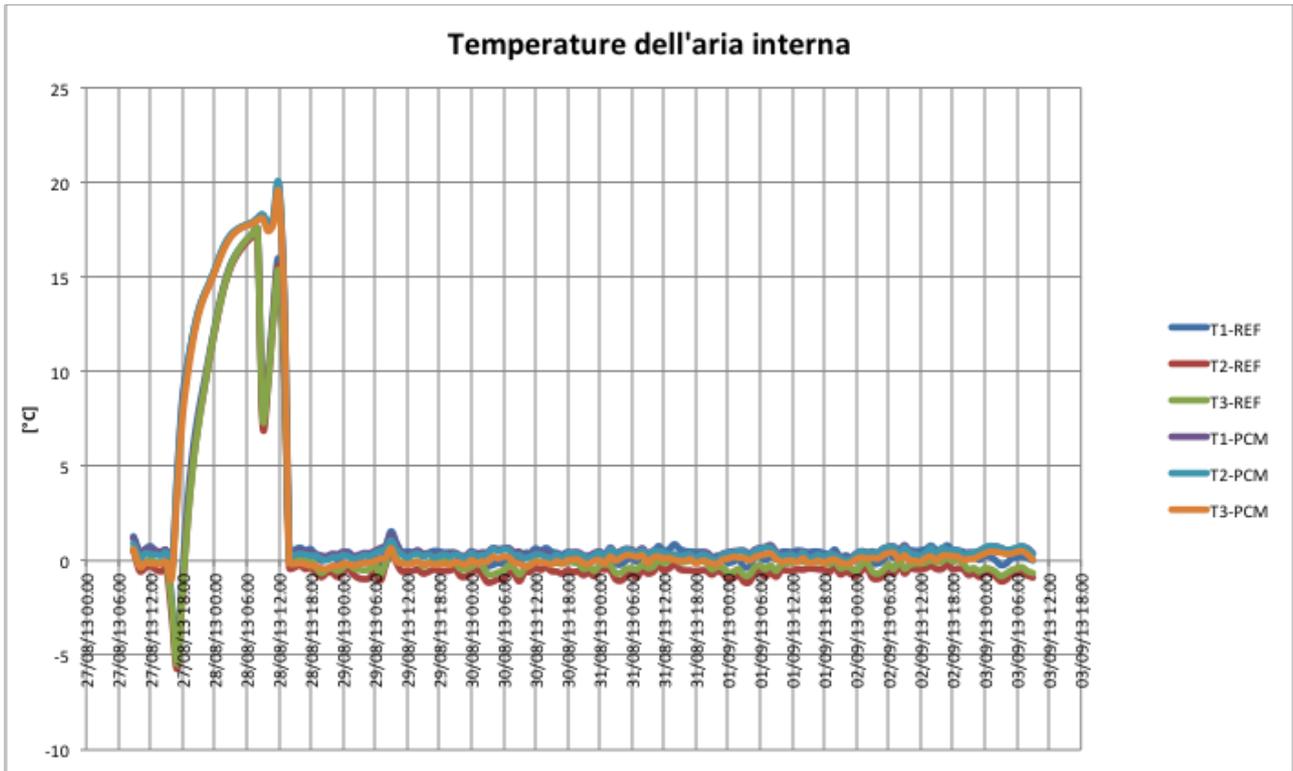


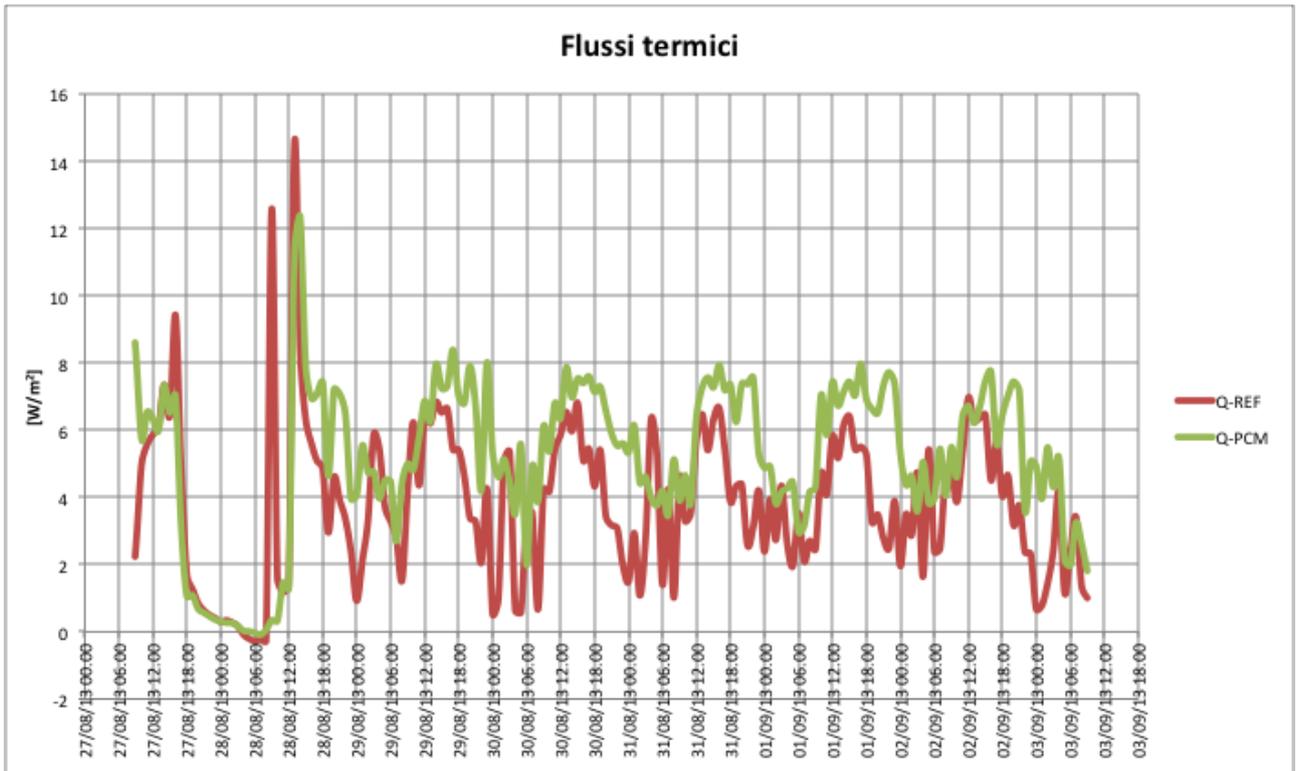


**3° SETTIMANA – IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE IMPOSTATO A 0°**

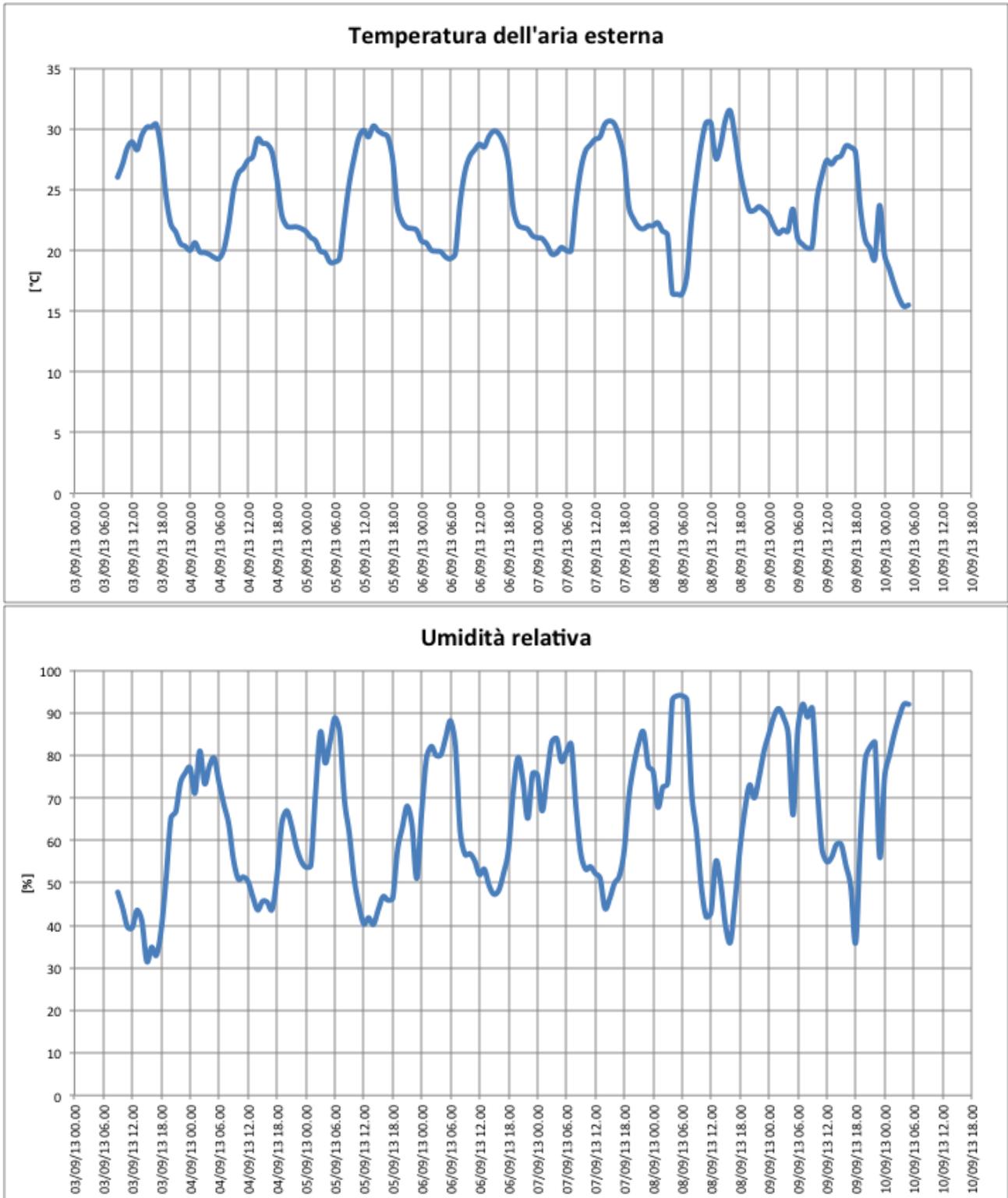


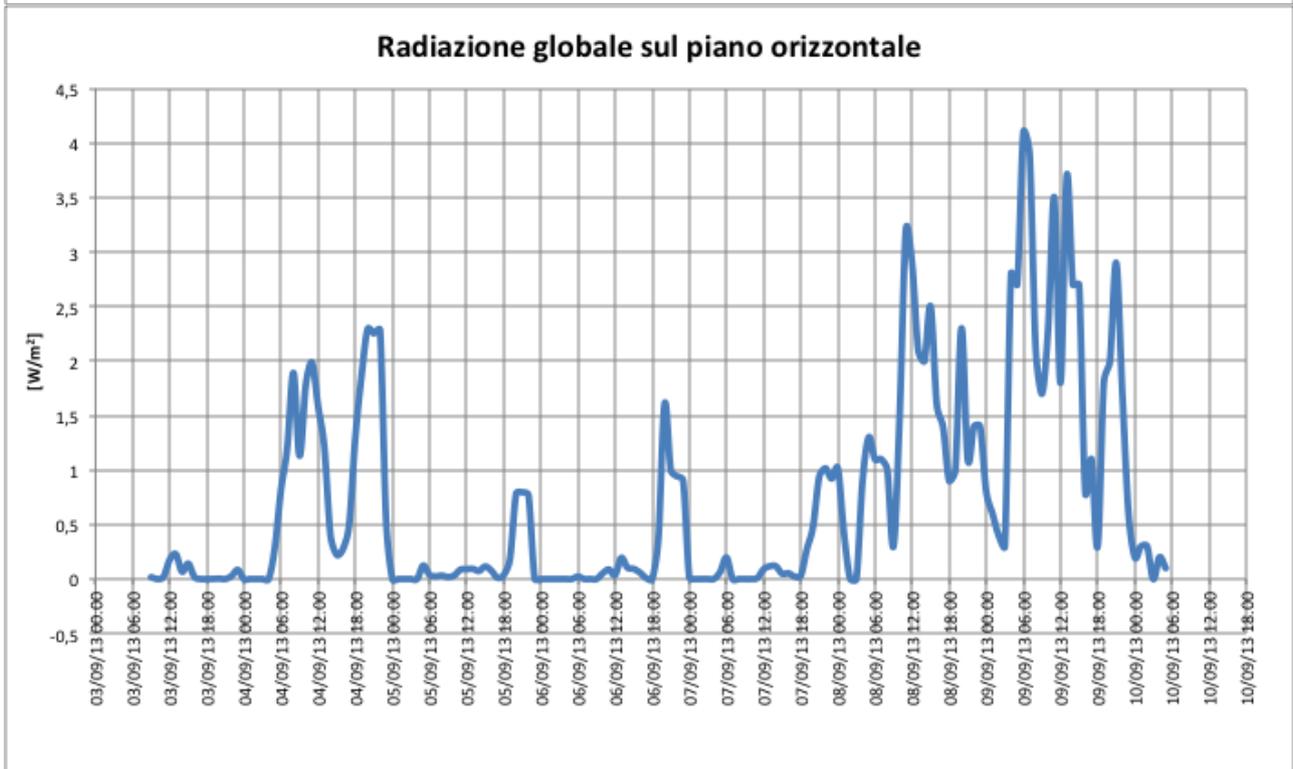
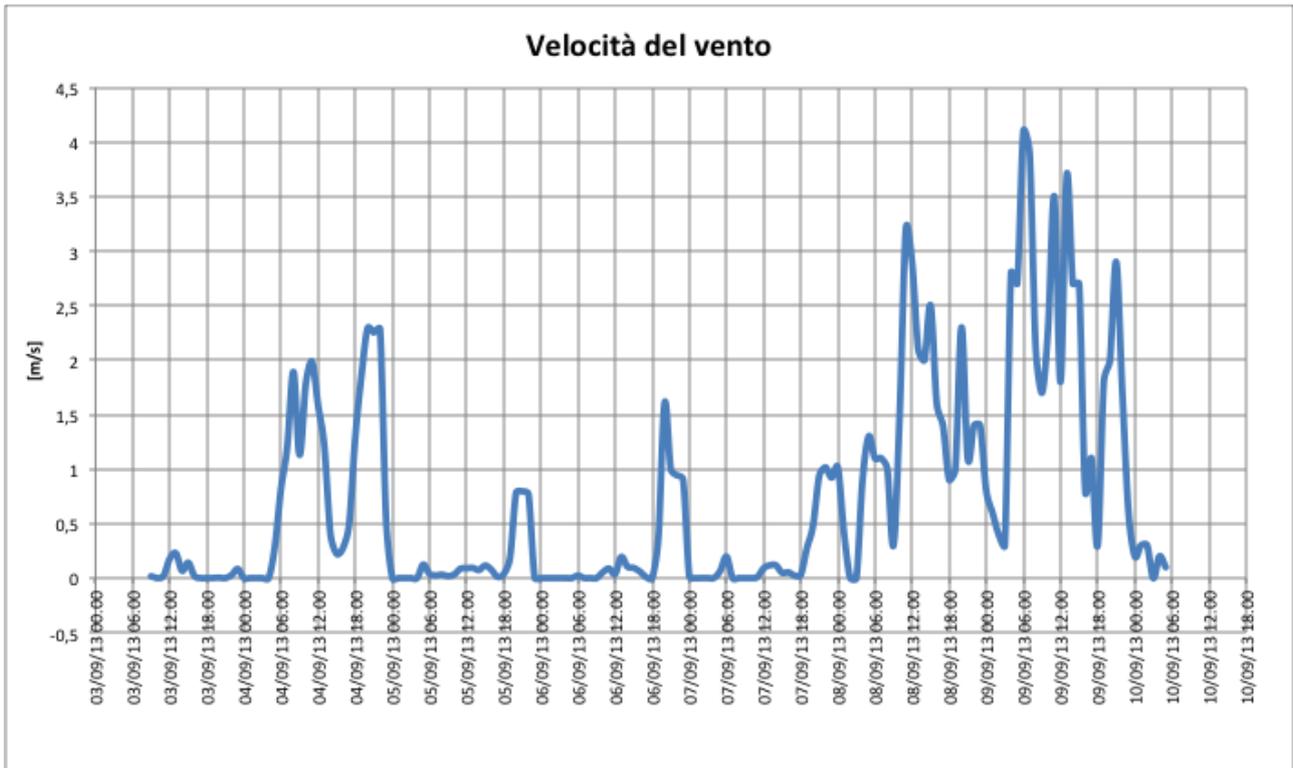


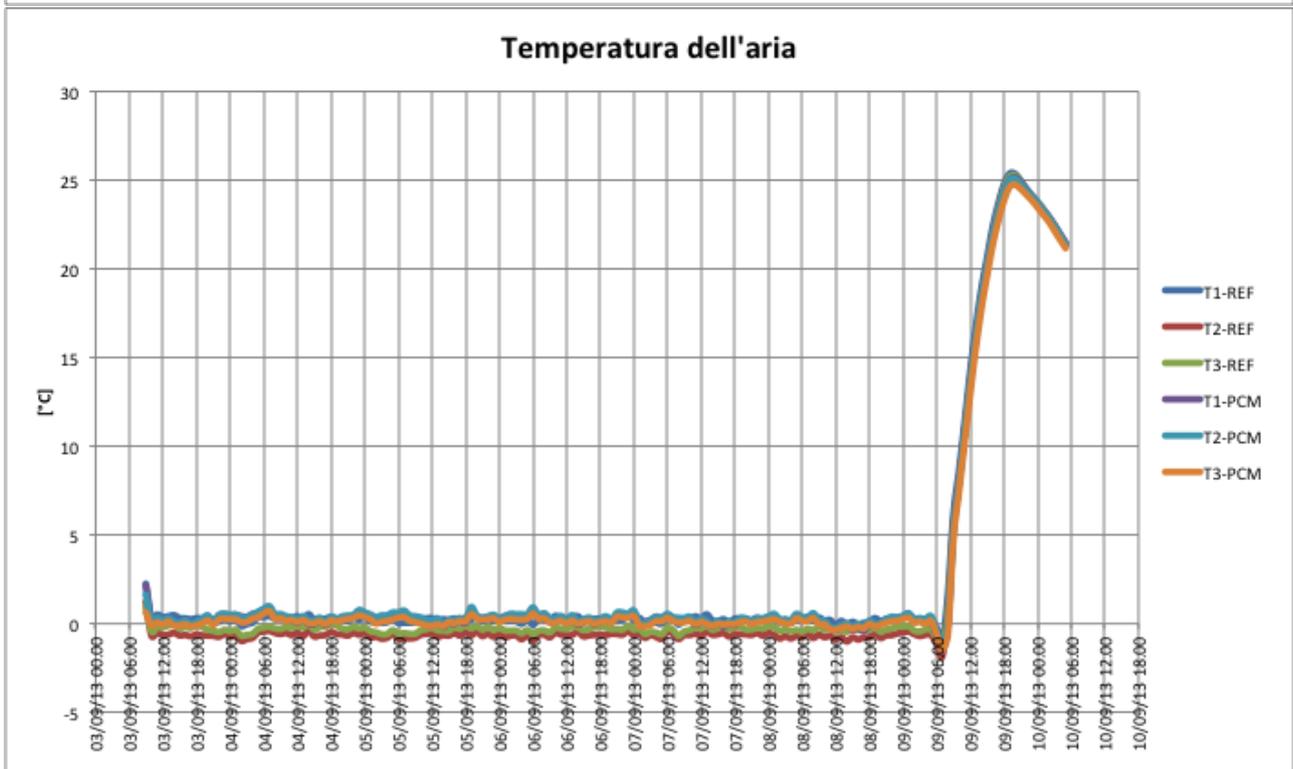
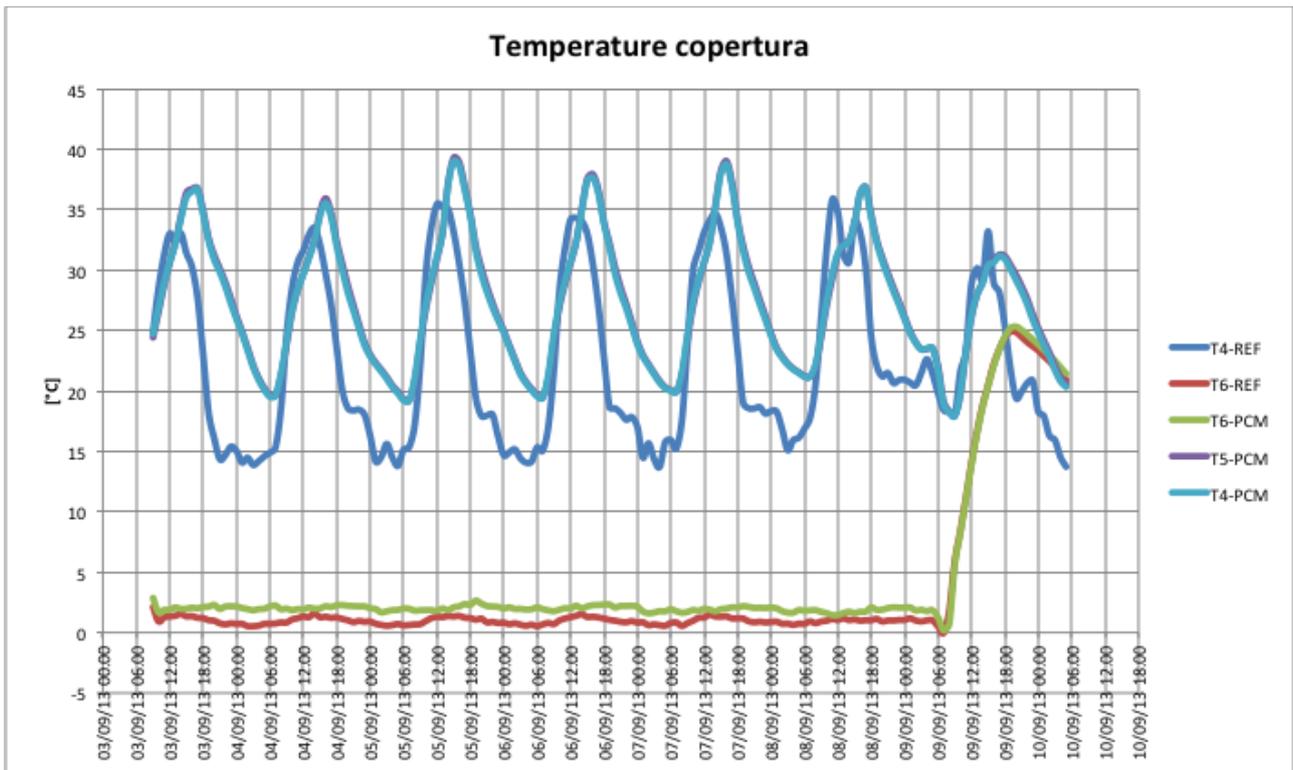


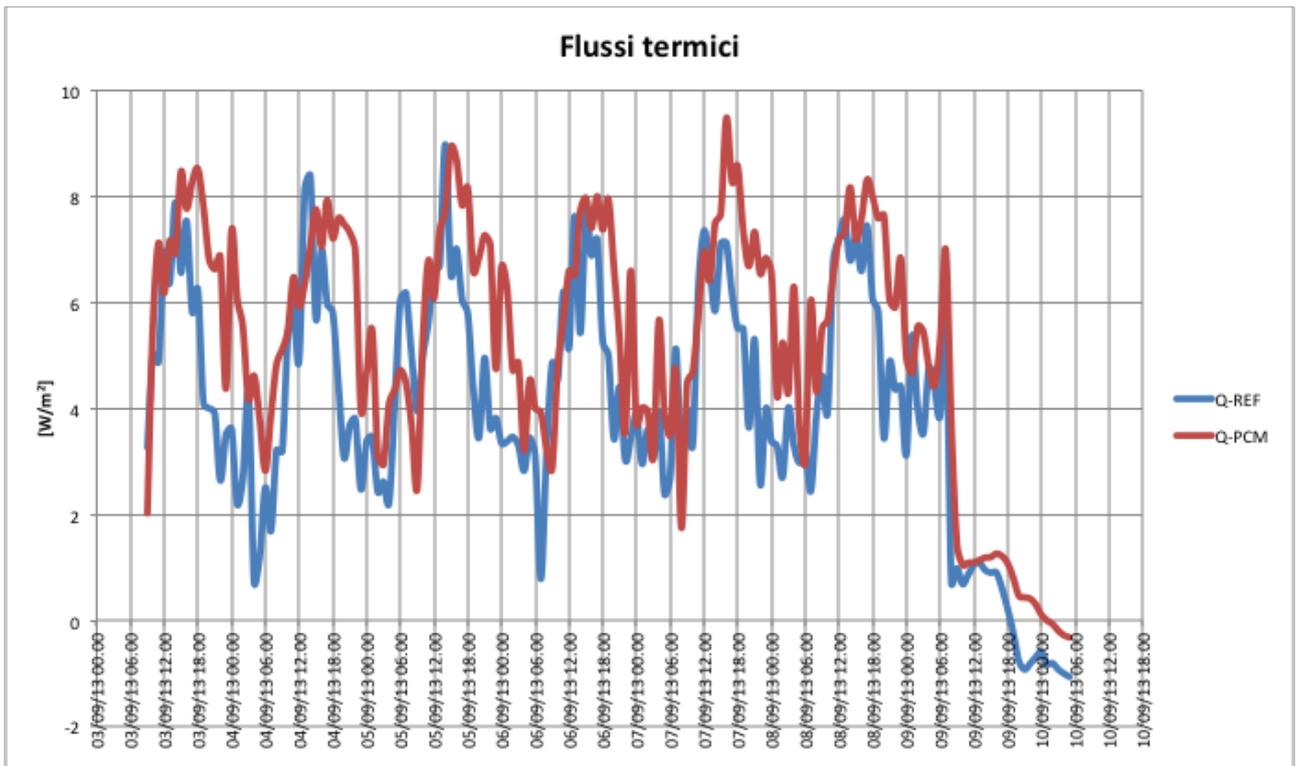


**4° SETTIMANA – IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE IMPOSTATO A 0°**









### 2.4.3 Validazione del metodo di analisi numerica con i dati sperimentali

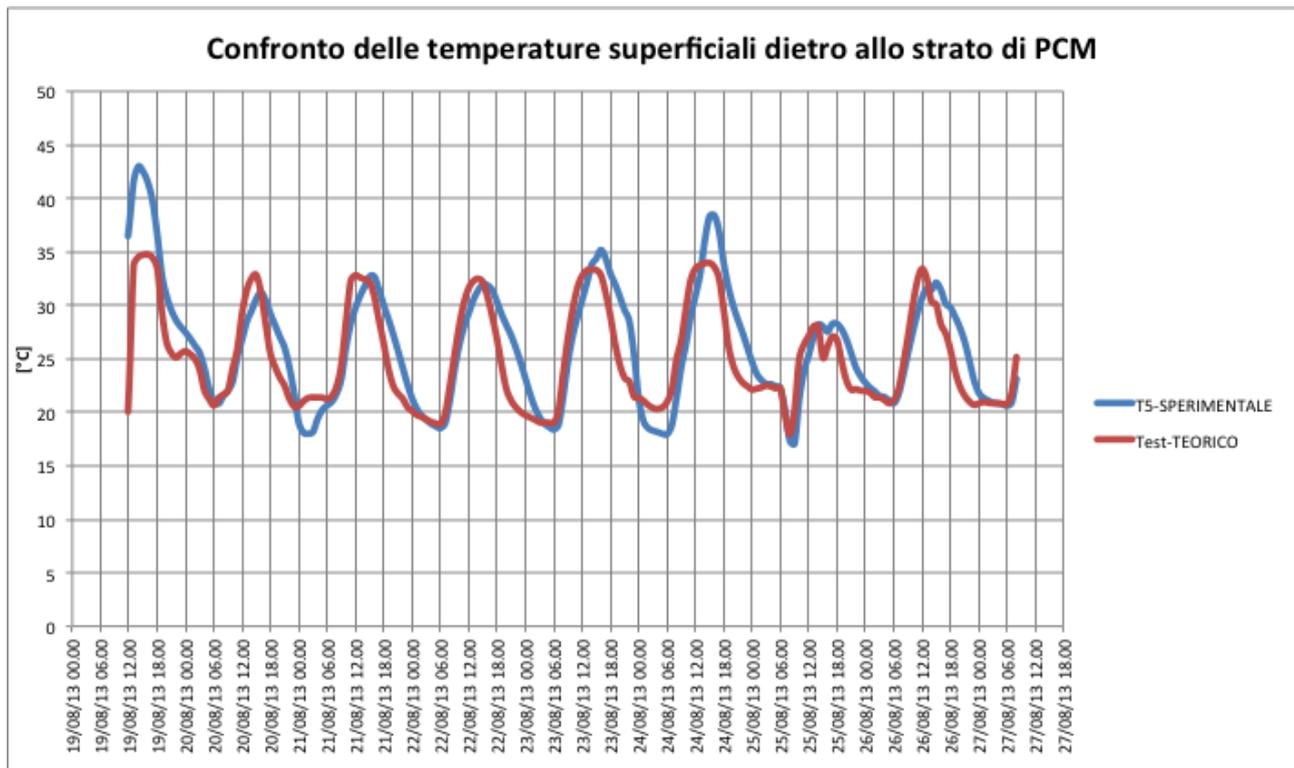
In questa sezione vengono confrontati i dati ottenuti dall'analisi sperimentale e quelli ottenuti dalle simulazioni numeriche. Obiettivo di tale confronto è di validare la metodologia di calcolo numerico.

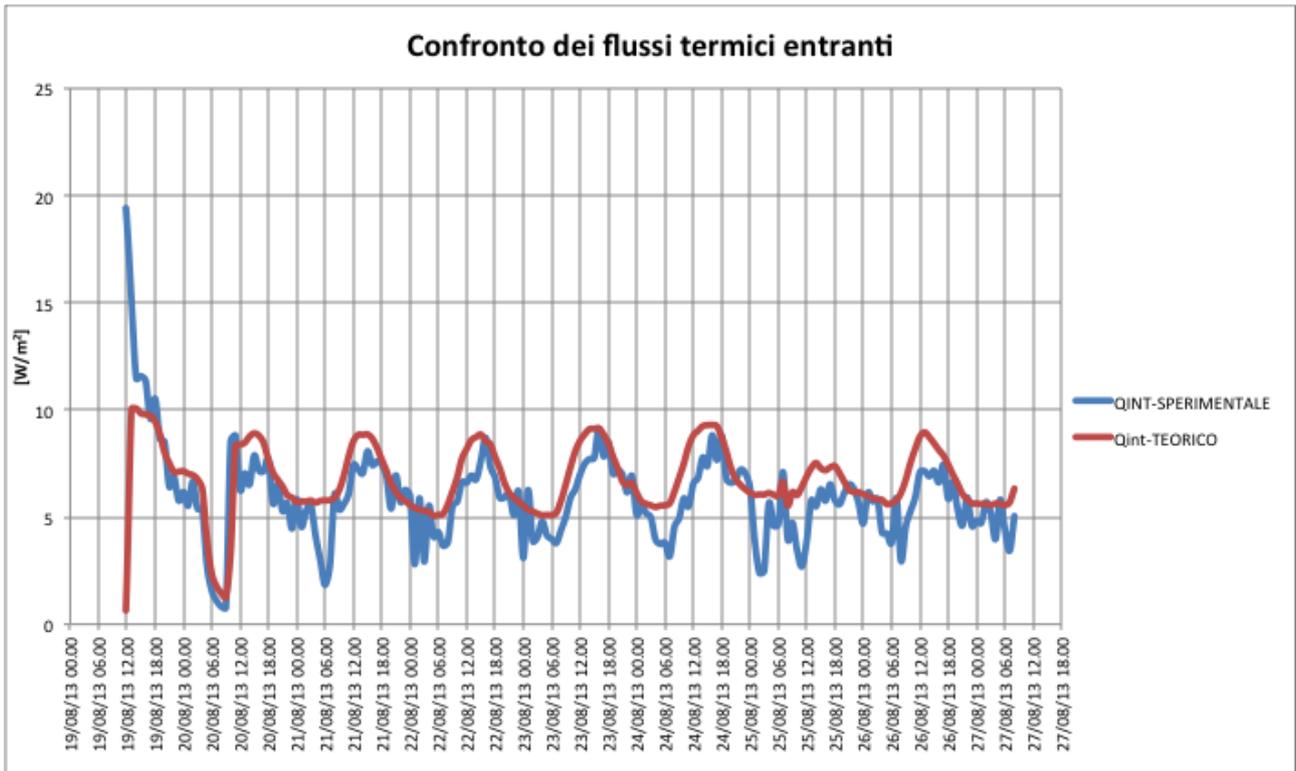
Per tale scopo sono stati inseriti nel software di simulazione i dati relativi alle condizioni climatiche esterne e quelle interne monitorati durante la campagna sperimentale. Il modello geometrico utilizzato è quello reale 2D analogo a quello di copertura con PCM, comprensivo di packaging con le dimensioni geometriche reali.

Il confronto è stato fatto sia utilizzando i flussi termici, misurati sulla superficie interna della copertura, sia utilizzando la temperatura misurata tra lo strato di PCM e il pannello sandwich di copertura.

Dai risultati di tali valutazioni, riportate sinteticamente nei seguenti grafici (**figure XX e XX**) si può notare come sia a livello di temperatura che di flussi termici i valori reali e simulati siano molto simili. Le differenze più significative, però si denotano sui flussi, probabilmente a causa dell'andamento anomalo delle misure, influenzate in maniera troppo significativa dall'oscillazione della temperatura interna e dai cicli di accensione e spegnimento della macchina frigorifera.

A livello di temperature, invece si nota una perfetta coincidenza in fase di carico, dove le curve sono in pratica coincidenti, mentre si denotano lievi scostamenti nella fase di scarico. Tale fenomeno è in parte imputabile al differente comportamento del PCM in fase di scarico (rispetto alla fase di carico) che nel modello numerico non viene considerato. Per quanto riguarda le differenze riscontrabili parte dell'errore potrebbe essere imputabile alle differenze tra il modello teorico e quello reale, in particolare relative a situazioni di non perfetto contatto tra gli strati.

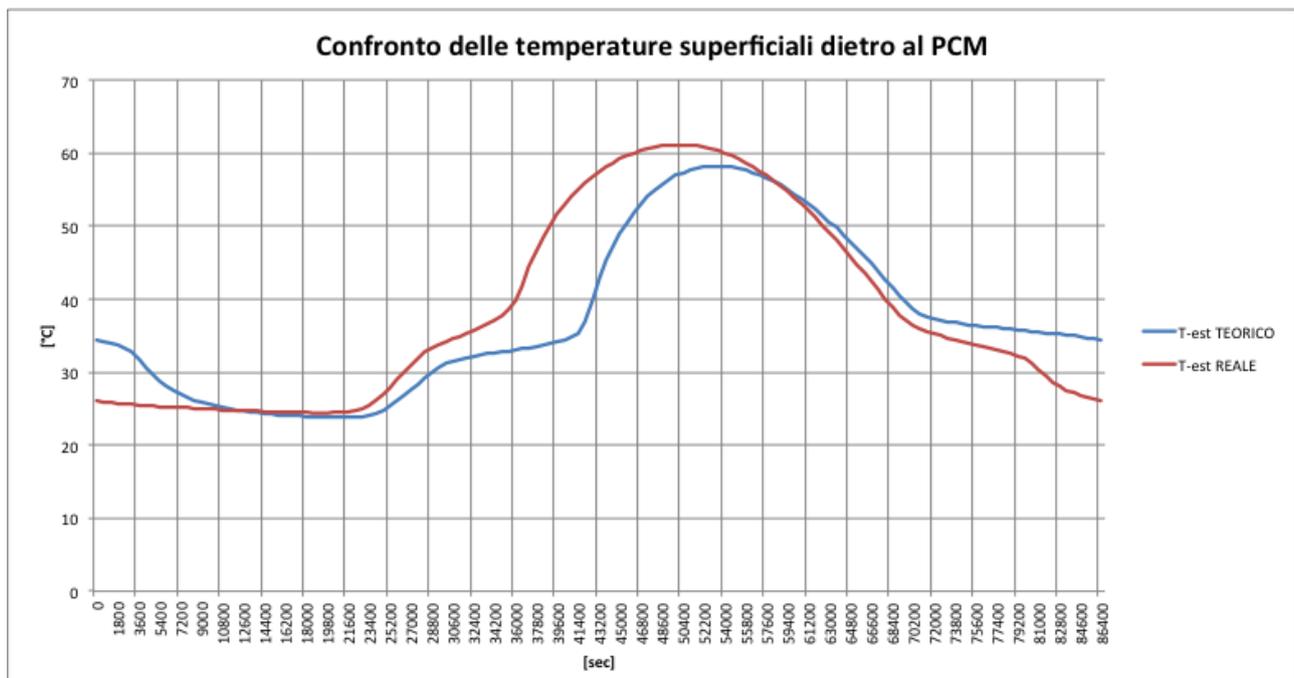


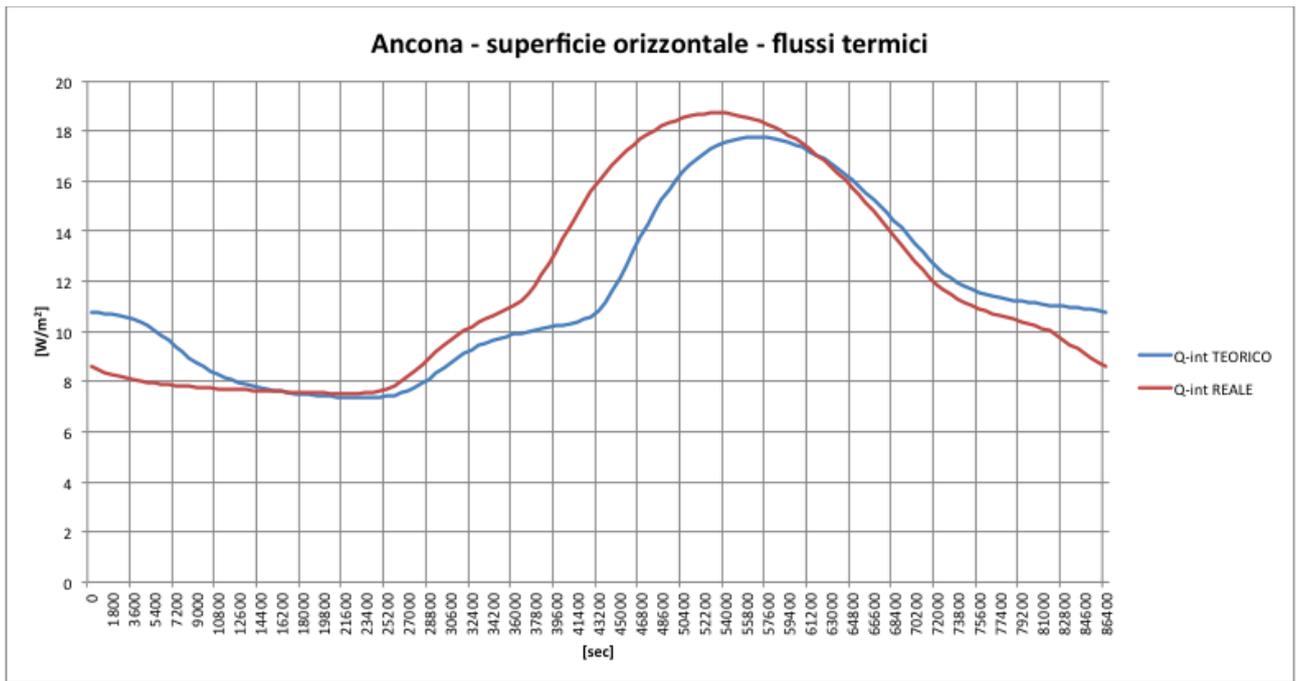


#### 2.4.4 Confronto tra il modello teorico e il modello reale (dati meteo Ancona – superficie Orizzontale)

In questo secondo confronto, viene fatta una comparazione tra il modello reale e quello teorico. Nel modello reale è inserito il packaging che contiene il PCM, quindi i contenitori in alluminio che non rendono omogeneo lo strato di PCM. Nel modello reale invece il PCM si presenta come uno strato omogeneo. Per ridurre al minimo l'incertezza derivante da fattori esterni non imputabili al packaging. Tale confronto è utile per verificare l'efficienza del sistema di contenimento scelto, in riferimento alla questione del trasferimento di energia termica. Il confronto viene effettuato utilizzando il metodo numerico e non i dati sperimentali. La comparazione è fatta sulle temperature e sui flussi termici. Per quanto riguarda la temperatura si prende in considerazione quella calcolata tra lo strato di PCM e il pannello sandwich. Per i flussi termici si fa riferimento al flusso termico calcolato sulla superficie interna.

Dai risultati si nota come ci sia una forte differenza sia nella fase di carico che di scarico, anche se nella prima fase tale scostamento è più significativo, con conseguenze anche sul valore di temperatura massimo raggiunto e di flusso termico. Al termine della fase di scarico le due curve si equivalgono, fino a quando la temperatura inizia a salire. Nello modello teorico, il gradino corrispondente al passaggio di fase durante la fase di carico, è più evidente sia in termini di durata che di inclinazione.





### 3 Conclusioni

Il presente lavoro mostra come attraverso l'applicazione di materiali a passaggio di fase nelle strutture dell'involucro di celle frigorifere sia possibile ridurre la richiesta di energia per la refrigerazione.

Attraverso una serie di analisi, condotte sia utilizzando strumenti di calcolo che sperimentali è stato possibile caratterizzare il comportamento energetico di tali interventi migliorativi.

Nella prima fase è stata fatta un'analisi dello stato dell'arte dell'applicazione dei PCM nel settore edilizio e più in generale di tutte le applicazioni presenti in bibliografia e in commercio. Da tale analisi preliminare è stato possibile fare una prima ipotesi di applicazione nelle celle frigorifere, una selezione dei PCM più adatti e del tipo di contenimento. La fase di analisi numerica ha avuto lo scopo oltre di dare dei valori su quali fare considerazioni sui benefici apportati dal PCM, di mettere a punto una metodologia di simulazione del comportamento del PCM. Tale metodologia è stata inoltre validata per avere un riferimento sull'attendibilità dei risultati ottenuti. Da tali simulazioni è stato possibile verificare il beneficio in termini di riduzione dei flussi termici entranti e di diminuzione delle temperature superficiali delle strutture dell'involucro. Tre località climatiche (Milano, Ancona, Palermo) rappresentanti il contesto italiano sono state analizzate, simulando per il giorno tipo estivo (dal punto di vista climatico il più estremo dal punto di vista della radiazione e delle temperature esterne), il comportamento delle strutture dell'involucro con e senza PCM. Dal confronto è stato possibile verificare il tipo e la quantità di PCM che consente la migliore performance, e che riesce a compiere un ciclo completo di fusione e solidificazione. Per tale verifica sono stati selezionati due tipi di PCM, uno organico (paraffina punto di fusione 35°C) e inorganico (sale idrato punto di fusione 32,5 °C), entrambi presenti in commercio. Entrambi hanno determinato comportamenti molto simili e incoraggianti dal punto di vista dei benefici.

La seconda analisi è stata effettuata sperimentalmente su celle frigorifere sottoposte a condizioni climatiche reali esterne. In tale sperimentazione, condotta durante il periodo estivo, sono stati monitorati due moduli della stessa tipologia, differenziati dalla presenza o meno dello strato di PCM in copertura. Per tale analisi sperimentale, un sistema di packaging costituito da elementi modulari in alluminio è stato realizzato. Tale sperimentazione ha avuto lo scopo di raccogliere una serie di informazioni riguardo al comportamento del PCM e di mettere a punto un sistema di misura che consenta di testare questo tipo di applicazioni su moduli frigoriferi. Il sistema di misura, seppur con le incertezze e i limiti determinati dalla difficoltà di messa a punto, ha dato importanti dati per la caratterizzazione del PCM e per eventuali sviluppi futuri. Alla fine del lavoro è stato effettuato un confronto tra i dati ottenuti dall'analisi numerica con i dati sperimentali.

Con le analisi e gli incoraggianti risultati ottenuti, per dare una maggior completezza e utilizzabilità delle informazioni contenute nel presente documento, è auspicabile che si proseguì con:

- miglioramento del packaging
- sperimentazione con l'intero involucro rivestito di PCM
- approfondito dettaglio nell'analisi numerica
- miglioramento del funzionamento dell'impianto delle celle frigorifere (riduzione delle fluttuazioni interne)
- analisi teorico-sperimentale con altre modalità di applicazione (pcm sulla superficie interna del pannello e combinata con l'impianto)
- studio di fattibilità tecnica e economica
- analisi costi-benefici

## 4 Riferimenti bibliografici

- [1] A. Abhat, Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials, *Solar Energy* 30 (1983) 313–332.
- [2] R. Fioretti, “Materiale a cambiamento di fase in edilizia” *Azero* 04, 2012
- [3] IEA ECBCS “Annex 44 Expert Guide – Part 2 Responsive Building Elements”.
- [4] S.D. Sharma, Kazunobu Sagara “latent heat storage materials and systems: a review” *International Journal of Green Energy*, 2: 1–56, 2005
- [5] B. Zalba, J.M. Marín, L.F. Cabeza, H. Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering* 23 (2003) 251–283.
- [6] R. Fioretti, P. Principi, “Blocchi termici in laterizio: analisi teorico-sperimentale”, *Costruire in laterizio* 141 – 2011
- [7] R.Fioretti, P.Principi “Analisi teorico-sperimentale su blocchi termici in laterizio a prestazioni energetiche avanzate”, *Industria dei Laterizi*, marzo-aprile 2010
- [8] K. Darkwa, P.W. O’Callaghan, Simulation of phase change drywalls in a passive solar building, *Applied Thermal Engineering* 26 (2006) 853–858.
- [9] A. Carbonari, M. De Grassi, C. Di Perna, P. Principi, Numerical, experimental analysis of PCM containing sandwich panels for prefabricated walls, *Energy and Buildings* 38 (2006) 472–483.
- [10] Paolo Principi, Roberto Fioretti “Thermal analysis of the application of pcm and low emissivity coating in hollow bricks” *Energy and Buildings* 51
- [11] UNI EN ISO 6946, Building components and building elements, Thermal resistance and thermal transmittance, calculation method, European Committee for Standardization, 1996.
- [12] UNI 10349, Heating and cooling of buildings, Climatic data, Italian Standard, 1994.

## 5 Abbreviazioni ed acronimi

PCM Phase Change Material

DIISM Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

UNIVPM Università Politecnica delle Marche

## 6 Curriculum scientifico dei componenti del gruppo di lavoro impegnato nell'attività.

### CV Paolo Principi

Paolo Principi è Professore Ordinario di Fisica Tecnica Ambientale presso l'Università Politecnica delle Marche, Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche. Attualmente è titolare dei corsi di Progettazione di impianti di climatizzazione, Fisica tecnica ambientale e Risorse energetiche ed energie alternative.

E' stato responsabile di unità locale di ricerca di programmi Nazionali MURST 40% di Rilevante interesse nazionale - Anno 1994 –Titolo: "Controllo fisico-tecnico degli ambienti di lavoro. Innovazione tecnologica", Anno 1995 –. Titolo :“ Problematiche energetiche e condizioni ambientali determinate dall'utilizzo di sistemi integrati componente edilizio-impianto”. Anno 1996 –. Titolo :“ Problematiche energetiche e condizioni ambientali determinate dall'utilizzo di sistemi integrati componente edilizio-impianto”.

E' stato responsabile di unità locale di ricerca di programmi Nazionali PRIN 2006 e PRIN 2008

E' stato membro del Comitato Tecnico Amministrativo del Ministero dei Lavori Pubblici, Provveditorato Regionale alle Opere Pubbliche per la Regione Marche, in qualità di esperto di impianti tecnologici.

E' stato responsabile scientifico del settore energetica del gruppo di ricerca europea, dal titolo: Changeable Thermal Inertia Dry Enclosures C-TIDE, nell'ambito del 5<sup>th</sup> Framework Programme della Comunità Europea , ricerca CRAFT .

E' stato responsabile del gruppo di ricerca locale nell'ambito Annex 35 "Control Strategies for Hybrid Ventilation in New and Retrofitted Office Buildings (HybVent)" dell'IEA (International Energy Agency).

E' stato membro del Consiglio dei docenti del Dottorato di ricerca in "Ingegneria, Architettura ed Economia per la sostenibilità dell'ambiente urbano e rurale" con sede presso l'Università degli Studi di Ancona.

E' stato membro del Consiglio di Amministrazione dell'Università Politecnica delle Marche in qualità di rappresentante dei professori associati.

E' stato membro del Consiglio Direttivo ISES Italia ( International Solar Energy Society Italia )

E' stato membro della Commissione Spin-Off del Consiglio di Amministrazione per la redazione del regolamento di Ateneo prima e per la valutazione delle proposte di nuove società di Spin-Off.

E' coordinatore del curriculum di Protezione Civile ed Ambientale della Scuola di Dottorato dell'Università Politecnica delle Marche.

E' componente del gruppo di lavoro per il "supporto alle attività di individuazione di tipologie di moduli-container ad uso tecnico-sanitario, sociale, logistico e dei relativi capitolati" della Presidenza del Consiglio dei Ministri-Dipartimento della Protezione civile.

Autore di più di 120 pubblicazioni scientifiche riportate su riviste internazionali, nazionali, proceedings di congressi nazionali ed internazionali e pubblicazioni monografiche, ha sviluppato la propria attività scientifica e di ricerca nei seguenti campi:

comportamento termoigrometrico dell'edificio, pompe di calore, trasmissione del calore, uso in edilizia di materiali in passaggio di fase (PCM) , efficienza energetica degli edifici, tetti verdi, tecniche per l'utilizzo dell'energia solare, componenti innovativi di Impianti termotecnici, sistemi solari passivi, ventilazione ibrida e naturale, dissalazione con metodi termici, solar pond,

ottimizzazione di elementi per l'involucro in edilizia, protocolli di certificazione energetico ambientale, uso di biomasse ai fini della protezione civile

**CV. Roberto Fioretti**

Roberto Fioretti, ingegnere edile architetto con laurea conseguita presso L'Università Politecnica delle Marche con una tesi sull'applicazione dei materiali a passaggio di fase (PCM) negli involucri edilizi. Consegue il dottorato di ricerca in energetica proseguendo il lavoro sui PCM. Collabora dal 2005 con il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM) dell'Università Politecnica delle Marche, seguendo le ricerche riguardanti l'efficienza energetica in edilizia, ricerca e sviluppo di prodotti e sistemi innovativi per l'edilizia, green roof, comfort microclimatico, LCA e sistemi di certificazioni della sostenibilità energetica e ambientale. Svolge inoltre l'attività di libero professionista ed è autore di diverse pubblicazioni su riviste scientifiche nazionali ed internazionali.