

---

## *Indice*

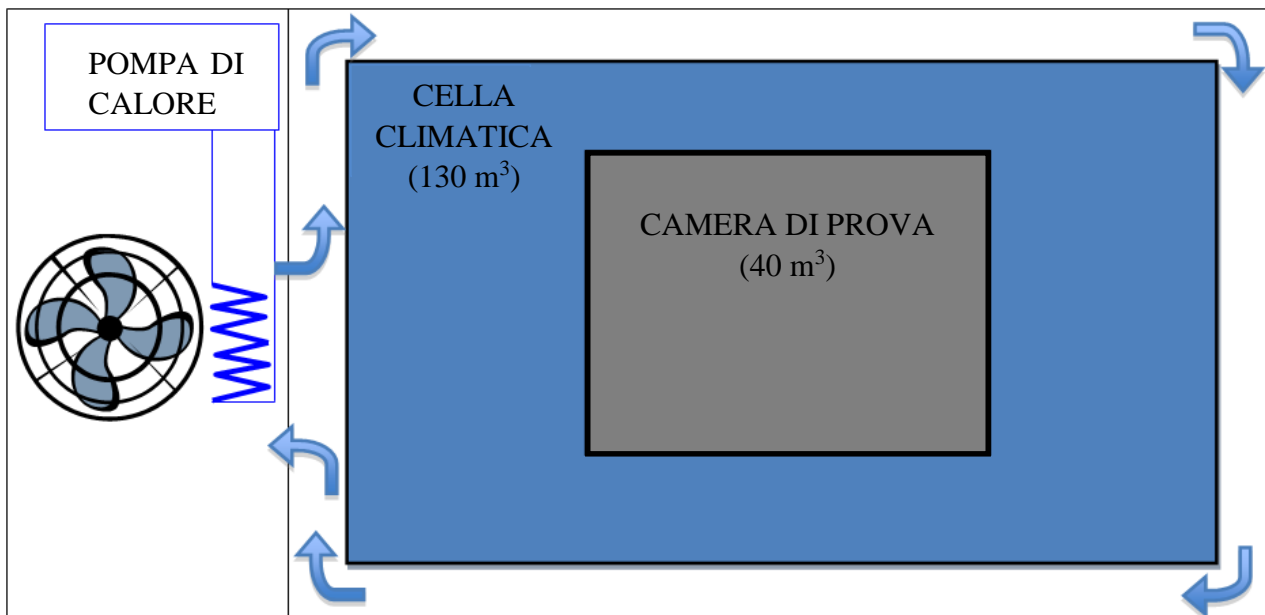
<b>1</b>	<b>SOMMARIO.....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>APPARATO SPERIMENTALE .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>STRATIGRAFIA DEL PROTOTIPO DI IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE RADIANTE A SOFFITTO</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>MISURA IN REGIME STAZIONARIO DELLE PRESTAZIONI TERMICHE DEI SISTEMI RADIANTI ..</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>MISURA DELLA TEMPERATURA SUPERFICIALE DEL PAVIMENTO RADIANTE E DEL FLUSSO TERMICO MEDIANTE UTILIZZO DELLA TERMOGRAFIA INFRAROSSA.....</b>	<b>4</b>
<b>6</b>	<b>RISULTATI .....</b>	<b>7</b>
<b>7</b>	<b>VALUTAZIONE DEL SOFFITTO RADIANTE IN REGIME TRANSITORIO .....</b>	<b>8</b>

## 1 SOMMARIO

In questo rapporto tecnico si presentano le attività relative alla caratterizzazione di un prototipo di impianto di climatizzazione radiante, installato a soffitto, nell'ambito del contratto stipulato tra Errevi S.r.l. e ITC-CNR.

## 2 APPARATO SPERIMENTALE

All'interno del capannone dell'ITC-CNR è stata allestita una cella climatica di circa 130 m<sup>3</sup> di volume. All'interno della cella è stata in seguito costruita una camera di prova per la misura delle prestazioni di sistemi di climatizzazione radiante di circa 40 m<sup>3</sup> seguendo le indicazioni delle normative vigenti (figura 2.1). Un impianto a tutta aria trattata provvede a climatizzare la camera di prova facendo fluire l'aria nell'intercapedine che circonda la cella climatica.



**Figura 2.1: Schema dell'impianto sperimentale.**

La misura delle condizioni di prova e dei flussi termici scambiati si ottiene con una rete di sensori che misurano temperature, portata di fluido, flusso termico.

Tutti i sensori sono collegati ad un sistema di acquisizione dati centralizzato, consultabile remotamente in tempo reale, operante con un software dedicato sviluppato in ambiente Labview®.

Nell'impianto di generazione di acqua refrigerata e riscaldata sono posizionati i sensori elencati in tabella 2.1.

Tipo di misura	Strumento	n.
Temperatura acqua	Pt100	4
Portata	Misuratore elettromagnetico	1

**Tabella 2.1: Sensori posizionati nell'impianto di produzione di calore**

Nella tabella successiva sono invece elencati tutti i sensori posizionati all'interno e all'esterno della camera di prova.

Tipo di misura	Strumento	Numero
Temperatura superficiale	Pt100	8
Temperatura aria	Pt100	8
Temperatura acqua	Pt100	4
Temperatura media radiante	Globotermometro	1

**Tabella 2.2: Sensori posizionati nella camera di prova**

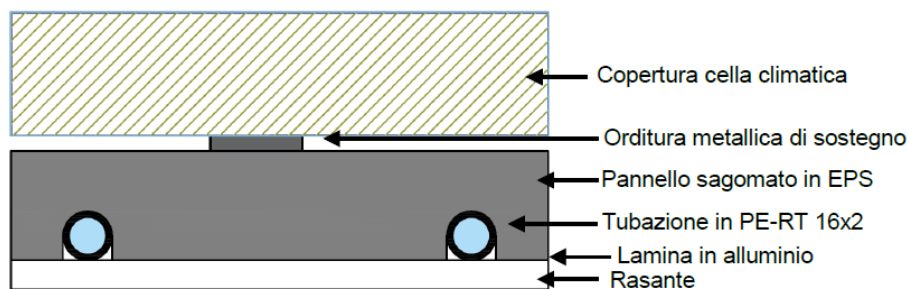
Nel dettaglio, i sensori per la misura della temperatura dell'aria e superficiale sono stati posizionati nel modo seguente:

- 8 sonde di temperatura superficiale, due per ciascuna delle 4 pareti della camera di prova, una posta sul lato interno e una sul lato esterno;
- 4 sonde di temperatura dell'aria poste al centro della camera di prova a 0.1, 1.1, 1.7 e 2.3 m di altezza;
- 4 sonde di temperatura dell'aria poste nella cella climatica che racchiude la camera di prova (una per ogni lato della cella);
- 1 globotermometro, posto al centro della camera di prova all'altezza di 1.1 m, per la misura della temperatura di riferimento della camera di prova.

### 3 STRATIGRAFIA DEL PROTOTIPO DI IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE RADIANTE A SOFFITTO

Il prototipo di soffitto radiante installato presso la cella climatica per la valutazione delle prestazioni dei sistemi di climatizzazione radiante ha una superficie 6 m<sup>2</sup>. La stratigrafia dei pannelli impiegati per i tratti rettilinei di tubazione del prototipo di soffitto radiante (figura 3.1) è la seguente:

- pannello in EPS di spessore 45 mm (29 mm sopra la tubazione);
- lamina in alluminio di spessore 0.2 mm, aderente al pannello in EPS;
- tubazione in PE-RT (diametro esterno 16 mm, spessore 2 mm);
- strato di finitura rasante Mapei Mapetherm (spessore variabile inferiore a 1 cm)



**Figura 3.1: Stratigrafia del prototipo di impianto a soffitto radiante (tratti rettilinei di tubazione).**

I pannelli contenenti i tratti curvilinei di tubazione sono costituiti degli stessi elementi della figura 3.1, ad eccezione della lamina di alluminio che in questa tipologia di pannelli è assente.

#### 4 MISURA IN REGIME STAZIONARIO DELLE PRESTAZIONI TERMICHE DEI SISTEMI RADIANTI

La misura delle prestazioni termiche dei sistemi radianti in regime stazionario sono state condotte all'interno della cella climatica, impostando tre diversi valori della temperatura di mandata del fluido termovettore, sia per le prove in riscaldamento sia per quelle in raffrescamento.

La potenza termica totale fornita dal sistema è stata calcolata in base al bilancio entalpico tra mandata e ritorno:

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_m - T_r) \quad (1)$$

dove:

- $Q$  è la potenza resa scambiata in W;
- $m$  è la portata di massa in  $\text{kg s}^{-1}$ ;
- $c_p$  è il calore specifico a pressione costante dell'acqua in  $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ;
- $T_m$  è la temperatura del fluido misurata all'ingresso del sistema radiante in K;
- $T_r$  è la temperatura del fluido misurata all'uscita del sistema radiante in K.

Al raggiungimento del regime termico stazionario, viene acquisito il valore di potenza resa dal sistema in prova a partire dal valore medio del flusso registrato per un intervallo di tempo pari a 60 minuti.

Allo scopo di limitare al minimo le dispersioni termiche attraverso l'involucro della stanza di prova e di mantenere costante la temperatura all'interno della stessa, si è operato in modo seguente:

- per le misure in riscaldamento, è stato mantenuto attivo un pavimento radiante che ha assorbito la potenza fornita dal soffitto in prova;
- per le misure in raffrescamento, sono stati attivati i dispositivi elettrici di carico termico (i cosiddetti "thermal dummies" definiti dalla norma tecnica UNI EN 14240) per compensare la potenza assorbita dal soffitto in prova.

#### 5 MISURA DELLA TEMPERATURA SUPERFICIALE DEL PAVIMENTO RADIANTE E DEL FLUSSO TERMICO MEDIANTE UTILIZZO DELLA TERMOGRAFIA INFRAROSSA

Le prestazioni del soffitto radiante sono state valutate mediante un rilievo termografico durante il suo funzionamento in regime stazionario e transitorio. Lo scopo è di analizzare la potenza scambiata con l'ambiente climatizzato, la distribuzione di temperatura superficiale e i tempi di messa a regime del sistema dopo l'attivazione (si veda capitolo 7 per quest'ultima analisi).

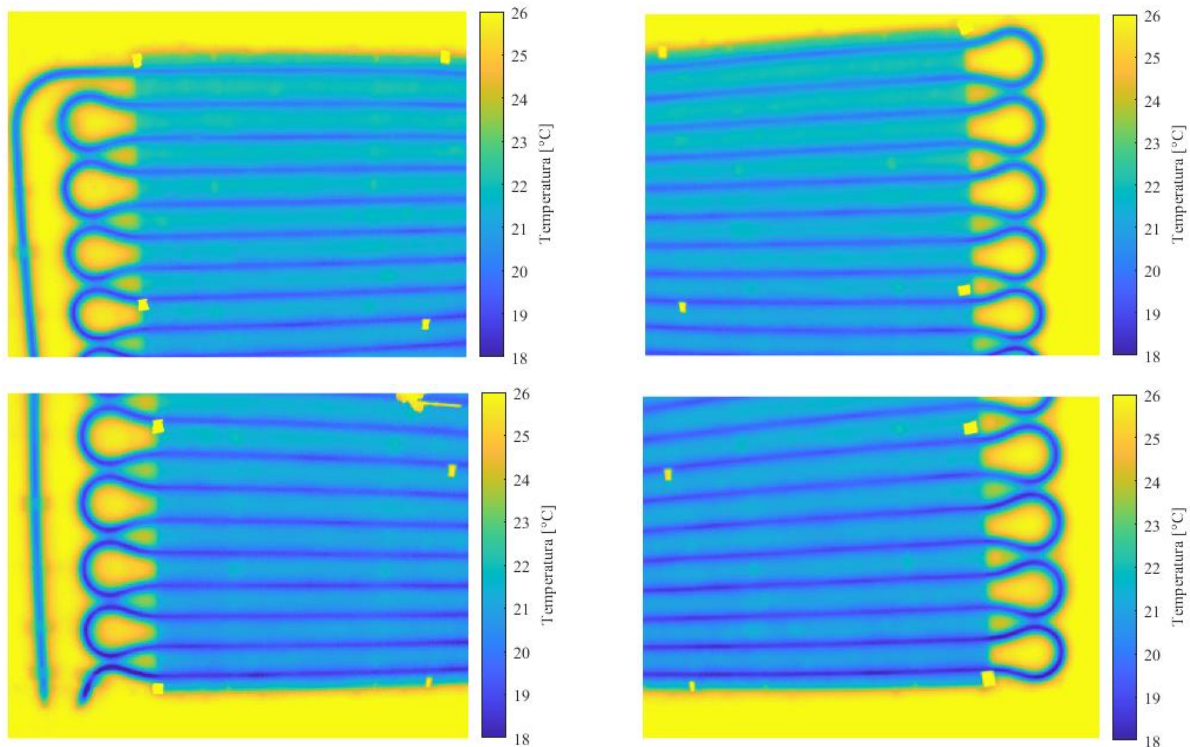
Durante il rilievo termografico è stata impiegata una termocamera Flir SC660 avente le caratteristiche tecniche elencate in tabella 5.1.

Lunghezza focale, campo di vista	131 mm, 7° fov; 38 mm, 24° fov; 19 mm, 45° fov
Risoluzione spaziale (IFOV)	0.65 mrad con ottica standard
Sensibilità termica / NETD	<30 mK a +30 °C
Frequenza immagini	30 Hz (60/120 Hz in modalità finestra)
Messa a fuoco; Zoom	Automatica o manuale; 1-8 x continuo, zoom digitale, modalità panning
Detector; intervallo spettrale di sensibilità	Microbolometro non raffreddato 7.5-13 $\mu\text{m}$

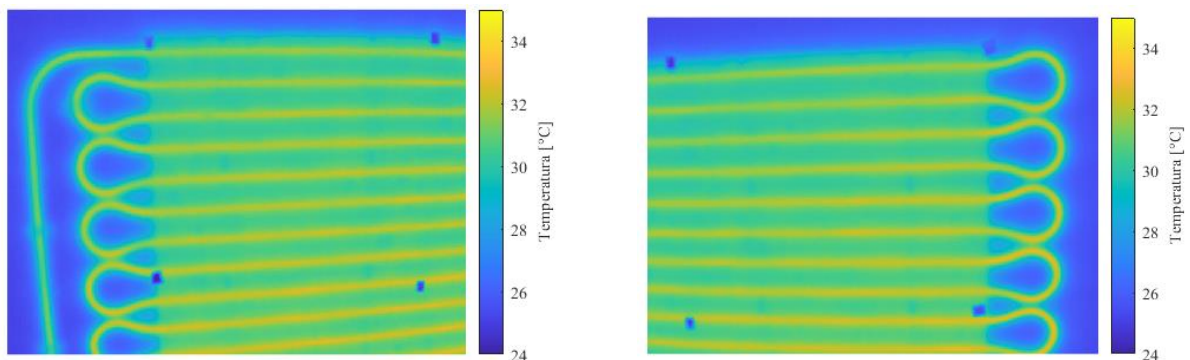
Dimensione immagine termica	640 x 480 pixel
-----------------------------	-----------------

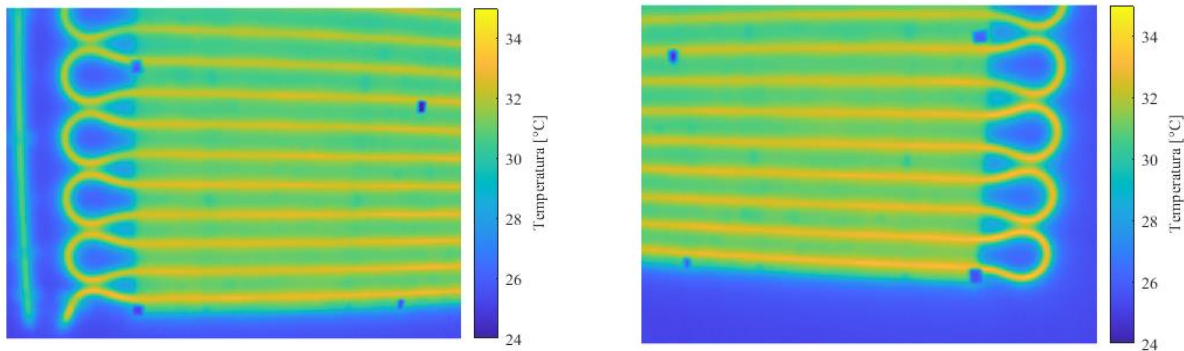
**Tabella 5.1: Principali specifiche tecniche della termocamera FLIR Systems SC660**

E' stato eseguito un rilievo termografico sia in regime di raffreddamento sia di riscaldamento. Sono state acquisite 4 termografie, ognuna delle quali ha inquadrato una differente porzione di soffitto (figure 6.1 e 6.2).



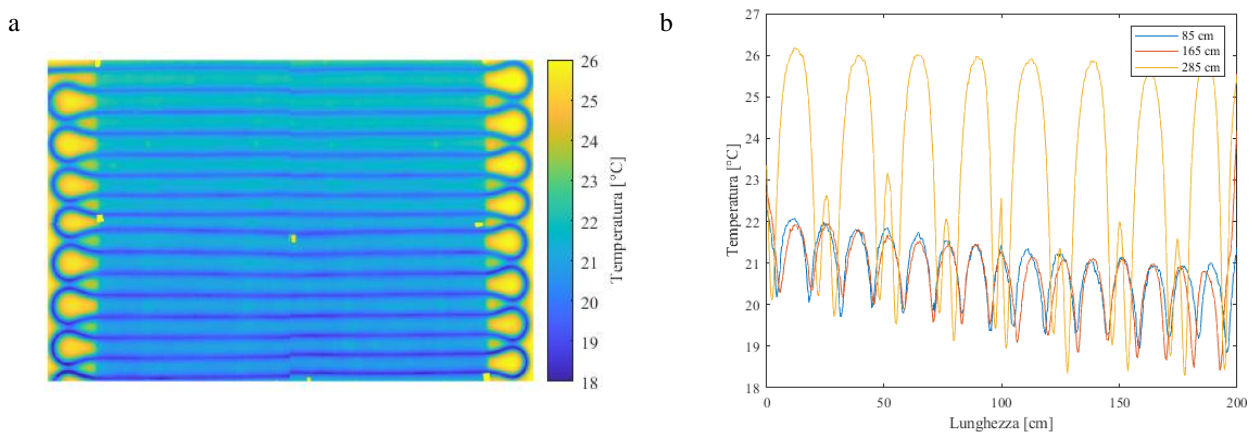
**Figura 6.1: Immagini termografiche originarie di porzione del soffitto radiante in raffreddamento: temperatura di mandata pari a 15.2°C**



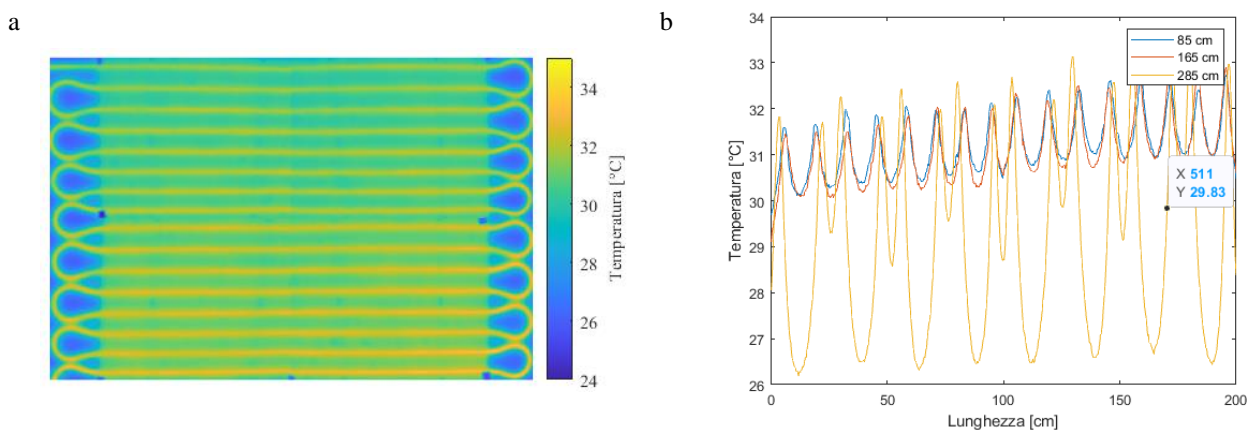


**Figura 6.2: Immagini termografiche originarie di porzione del soffitto radiante in riscaldamento: temperatura di mandata pari a 35.1°C**

Successivamente sono stati implementati alcuni algoritmi di elaborazione delle immagini termografiche sviluppati in ambiente Matlab® che hanno consentito di raddrizzare e assemblare le termografie acquisite in un'unica immagine rappresentativa del soffitto radiante. Sono stati inoltre tracciati tre profili di temperatura superficiale, in direzione perpendicolare alla tubazione, due lungo i tratti rettilinei e uno lungo i tratti curvilinei (figure 6.3 e 6.4).



**Figura 6.3: Mappa delle temperature superficiali (a) e profili di temperatura superficiale (b) per il soffitto radiante per temperatura di mandata del fluido pari a 15.2 °C.**



**Figura 6.4: Mappa delle temperature superficiali (a) e profili di temperatura superficiale (b) per il soffitto radiante per temperatura di mandata del fluido pari a 35.1 °C.**

La temperatura superficiale è piuttosto uniforme (variazione di temperatura lungo la mezzeria entro 1°C), mentre nei tratti curvilinei il dislivello di temperatura è maggiore a causa dell'assenza della lamina di alluminio tra tubazione e pannello in EPS.

## 6 RISULTATI

Nelle tabelle seguenti sono elencati i risultati delle misure sperimentali su un prototipo di impianto radiante a soffitto di superficie pari a 6 m<sup>2</sup> effettuate presso la cella climatica dell'ITC-CNR in regime stazionario, sia in riscaldamento che in raffrescamento. Per ciascuna delle prove sono state eseguite tre misure a temperature di mandata del fluido termovettore diverse (tabelle 6.1 e 6.2).

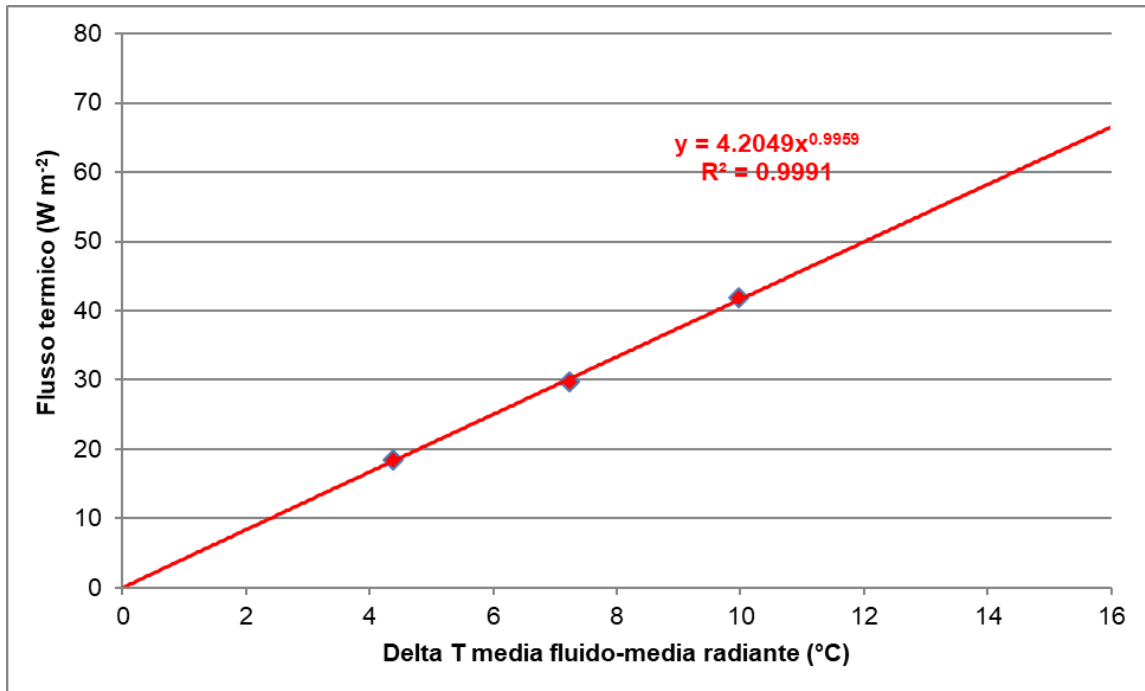
<b>Temperatura di mandata dell'acqua (°C)</b>	25.13	30.22	35.10
<b>Temperatura di ritorno dell'acqua (°C)</b>	24.17	28.69	32.96
<b>Differenza di temperatura dell'acqua (°C)</b>	0.97	1.53	2.15
<b>Temperatura media del fluido (°C)</b>	24.65	29.46	34.03
<b>Temperatura media radiante (°C)</b>	20.98	21.82	22.86
<b>Differenza temperatura media fluido-radiante (°C)</b>	3.67	7.64	11.17
<b>Portata (l min<sup>-1</sup>)</b>	1.64	1.66	1.68
<b>Potenza totale (W)</b>	110.2	178.3	251.5
<b>Flusso totale (W m<sup>-2</sup>)</b>	18.4	29.7	41.9
<b>Flusso totale per differenza di temperatura media fluido-riferimento pari a 15 K (W m<sup>-2</sup>)</b>	63.0		

**Tabella 6.1: Valori significativi relativi alle misure sperimentali sul soffitto radiante in riscaldamento.**

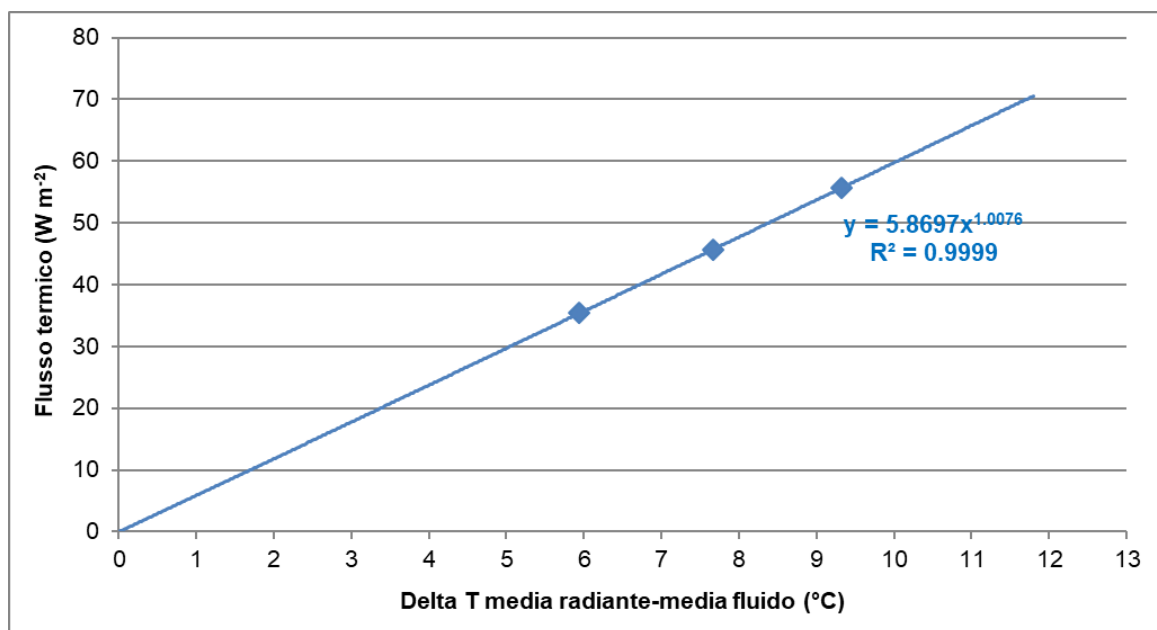
<b>Temperatura di mandata (°C)</b>	15.16	17.04	18.99
<b>Temperatura di ritorno (°C)</b>	17.60	19.04	20.53
<b>Differenza di temperatura dell'acqua (°C)</b>	2.44	1.99	1.53
<b>Temperatura media del fluido (°C)</b>	16.38	18.04	19.76
<b>Temperatura media radiante (°C)</b>	26.0	26.0	26.0
<b>Differenza temperatura media fluido-radiante (°C)</b>	9.62	7.96	6.24
<b>Portata (l min<sup>-1</sup>)</b>	1.97	1.97	1.98
<b>Potenza totale (W)</b>	334.1	273.5	212.3
<b>Flusso totale (W m<sup>-2</sup>)</b>	55.7	45.6	35.4
<b>Flusso totale per differenza di temperatura media fluido-riferimento pari a 8 K (W m<sup>-2</sup>)</b>	47.7		

**Tabella 6.2: Valori significativi relativi alle misure sperimentali sul soffitto radiante in raffrescamento.**

Nelle immagini successive (figure 6.1 e 6.2) è raffigurato l'andamento del flusso termico totale fornito dal prototipo di soffitto radiante, in riscaldamento e raffrescamento, al variare della differenza tra la temperatura media del fluido termovettore e la temperatura media radiante della camera di prova.



**Figura 6.1: Andamento del flusso termico totale fornito dal soffitto radiante in riscaldamento**



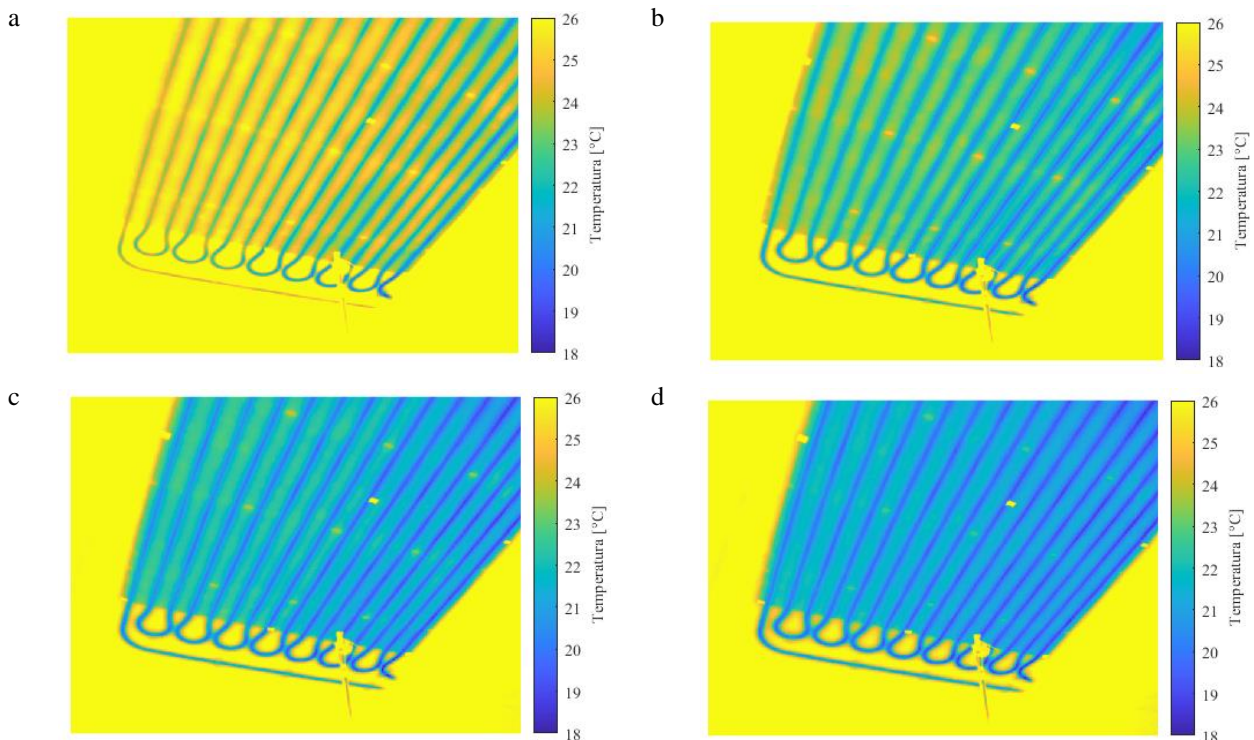
**Figura 6.2: Andamento del flusso termico totale fornito dal soffitto radiante in raffreddamento**

## 7 VALUTAZIONE DEL SOFFITTO RADIANTE IN REGIME TRANSITORIO

La caratterizzazione del sistema radiante in regime transitorio si è articolata nel modo seguente:

- 1) inizialmente il sistema si trova a temperatura ambiente e non vi è circolazione di fluido al suo interno;
- 2) raggiunto un regime stazionario del sistema, si inizia ad alimentare il sistema con fluido alla temperatura preimpostata, fino a raggiungere nuovamente il regime stazionario;
- 3) l'andamento della temperatura superficiale del sistema viene misurato mediante l'utilizzo di una termocamera a infrarossi FLIR SC660, con una sequenza di termogrammi registrati automaticamente ogni 20 secondi (figura 7.1).





**Figura 7.1: Termografie del soffitto radiante in regime transitorio dopo 5 minuti (a), 10 minuti (b), 15 minuti (c) e 30 minuti (d) dall'inizio della prova (temperatura di mandata: 17°C)**

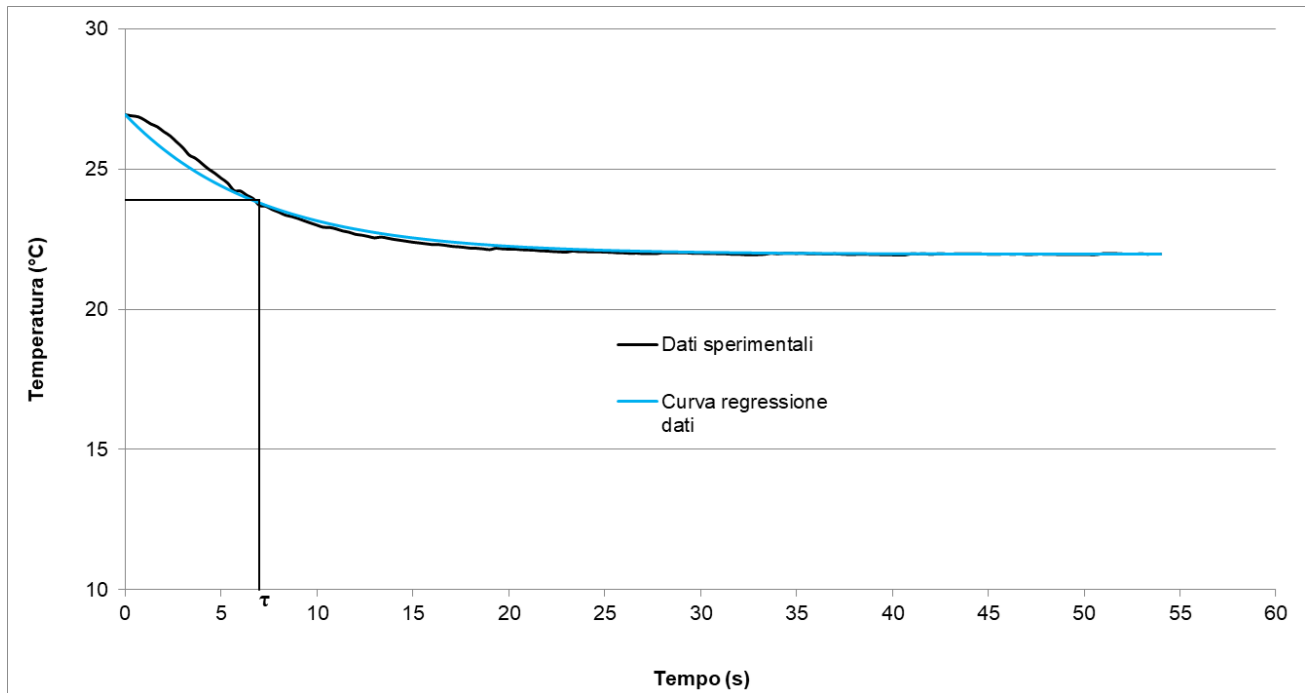
Sui dati di temperatura superficiale misurati sperimentalmente viene implementata una curva di regressione espressa dalla seguente equazione:

$$T(t) = T_{fin} + (T_{in} - T_{fin})e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

dove:

- $T(t)$  è il valore istantaneo della temperatura superficiale;
- $T_{in}$  è la temperatura superficiale all'inizio della prova;
- $T_{fin}$  è la temperatura superficiale alla fine della prova;
- $\tau$  è la costante di tempo del sistema.

La regressione dei dati sperimentali (figura 7.2) permette di determinare la costante di tempo del sistema, parametro normalmente utilizzato per studiare il comportamento dei fenomeni fisici in regime transitorio. La costante di tempo è definita come il tempo necessario affinché la temperatura superficiale media del soffitto raggiunga il 63.2% della differenza di temperatura tra l'inizio e la fine della prova.



**Figura 7.2: Andamento della temperatura superficiale del soffitto radiante (dati sperimentali e curva di regressione dei dati stessi) con indicazione della costante di tempo  $\tau$ : temperatura di mandata del fluido pari a 17 °C**

In base al modello fisico la costante di tempo è pari a 7 minuti.

Il tempo di messa a regime del soffitto radiante, ossia il tempo in cui il sistema raggiunge una temperatura costante (o una percentuale pari al 99% del valore di regime stazionario), è pari a circa 30 minuti.