

Università degli Studi di Cagliari



Scuola di dottorato in Ingegneria Civile ed Architettura
Dottorato in Ingegneria del Territorio
XX° Ciclo

Carlo Piga

**Evoluzione delle Tecniche Termografiche
nella Prospezione Geofisica:
verso la Tomografia Termica**

Tutor:
Prof. Ing. Gaetano Ranieri

Coordinatore:
Prof. Ing. Giorgio Querzoli

Si ringrazia il prof. Gaetano Ranieri per avermi dato la possibilità di frequentare il dottorato di ricerca ed il supporto morale e materiale per lo svolgimento, la stesura ed il completamento del lavoro di studio. Quindi il Collega ing. Francesco Loddo per l'appoggio morale nell'aver condiviso con me questi anni di studio-lavoro, i Tecnici di laboratorio Luigi Noli e Mario Sitzia per l'aiuto nel risolvere le problematiche di natura pratica, il Prof. Gianpiero Deidda per quelle di natura teorico-matematica, nonché l'ing. Rita Deiana per l'aiuto e l'ispirazione nell'impostazione della tematica di base

Evoluzione delle tecniche termografiche
nella prospezione geofisica:
verso la tomografia termica

Carlo Piga

Indice

1	Introduzione	2
1.1	Tomografia Elettrica e Tomografia Termica	3
1.2	Tomografia Sismica e Tomografia Termica	6
2	La Termografia	8
2.1	Storia	8
2.2	Lo spettro elettromagnetico	10
2.3	Radiazione di corpo nero	12
2.4	Radiazione dei corpi non neri	13
2.5	La misurazione	15
2.6	La termocamera	19
3	Lo stato dell'arte	22
3.1	Campi di applicazione	22
3.1.1	Ambiente e Territorio	22
3.1.2	Costruzioni	24
3.1.3	Architettura	27
3.1.4	Beni Culturali	29
4	Metodi Termografici attivi	34
4.1	Classificazione	34
4.2	Termografia Pulsata	35
4.2.1	Termografia Pulsata LP	37
4.2.2	Termografia Pulsata di fase PPT	37
4.3	La termografia Lockin	38
4.3.1	Informazioni ricavabili	39
4.3.2	Durata dell'analisi	40
4.3.3	Analisi quantitativa	41
4.4	Vibrotermografia	42

5	I fondamenti teorici	43
5.1	Le grandezze termofisiche	43
5.1.1	Conduttività	43
5.1.2	Diffusività	44
5.1.3	Effusività	44
5.1.4	Densità e Calore Specifico	44
5.2	Le onde termiche	45
5.2.1	Le onde diffusive	46
5.2.2	Riflessione	48
5.2.3	Rifrazione	48
5.2.4	Sorgente puntuale	48
5.3	Studio teorico preliminare di fattibilità del metodo.	49
6	Analogia geoelettrica-termica	57
6.1	Generalità	57
6.2	Condizioni di applicazione	59
6.3	La strumentazione	60
6.4	Applicazioni	61
6.4.1	Modello A	61
6.4.2	Modello B	70
6.5	La misura	72
6.6	L'elaborazione dei dati	76
6.6.1	Formula di misurazione	76
6.6.2	Georeferenziazione	77
6.6.3	Modellazione	78
6.6.4	Inversione	81
6.7	Risultati	87
7	Analogia termica-sismica	91
7.1	Introduzione	91
7.2	L'acquisizione	93
7.2.1	Il dispositivo energizzante	93
7.2.2	Modello di prova	102
7.3	L'elaborazione	105
7.3.1	Finalità delle misure	105
7.3.2	La misura termografica	106
7.3.3	Il software	108
7.3.4	La crosscorrelazione	113
7.4	L'interpretazione	117
7.4.1	Modello a 2 strati	117
7.4.2	Modello a 3 strati	118

<i>INDICE</i>	iii
7.4.3 Modello a 4 strati	120
7.4.4 Il software di modellazione	120
8 Applicazioni	122
8.1 Dati grezzi esperimento	123
8.2 Dati filtrati esperimento	139
9 Conclusioni	155
References	159

Capitolo 1

Introduzione

All'interno delle tematiche della geofisica, sia l'analisi di fenomeni ondulatori e campi di potenziale, sia il ricorso a metodi analitici o numerici per l'interpretazione degli stessi sono temi ricorrenti che hanno subito un progresso e un avanzamento continuo nel corso dei decenni. I fenomeni termici, possono essere inquadrati formalmente sotto forma di campo di potenziale o di fenomeno ondulatorio e presentano significative analogie a fenomeni fisici rispetto ai quali i metodi geofisici, tanto sotto l'aspetto teorico-matematico quanto sotto quelli tecnici e applicativi, si sono specializzati ad un livello più che avanzato. Le leggi che governano il campo di temperatura e la trasmissione del calore sono formalmente equivalenti a quelle che riguardano il campo di potenziale elettrico e la circolazione di corrente, tanto che il ricorso all'equivalenza elettrica, sia in regime stazionario che periodico, è consueto nella pratica progettuale. Esiste infatti una corrispondenza biunivoca tra le grandezze elettriche e le corrispondenti grandezze termiche ed è possibile passare da un problema all'equivalente senza approssimazione alcuna. Un'ulteriore analogia interessa la trasmissione del calore in presenza di fenomeni oscillatori periodici, frequenti in natura per la presenza dell'albedo e dell'alternarsi

delle stagioni. E' possibile in questo caso riconoscere la formazione di onde termiche che si propagano nel mezzo, analogamente a quanto accade per le onde acustiche, ottiche, elettromagnetiche. L'opportunità di utilizzare questo genere di sollecitazioni per indagare le caratteristiche delle regioni interne del mezzo, nel quale tali sollecitazioni si propagano, sta spingendo la ricerca verso lo studio di un'analogia termica dei fenomeni fisici di rifrazione e riflessione, proprie dell'ottica e della teoria delle onde sismiche. Tuttavia le onde termiche presentano peculiarità proprie delle onde diffusive e rispondono a leggi simili ma diverse da quelle che governano quelle paraboliche.

Durante il lavoro di tesi si é voluto approfondire la possibilità di servirsi di metodi termici per applicazioni geofisiche, concentrando l'attenzione sull'analogia esistente con fenomeni già sviluppati, trasponendo quindi il bagaglio di conoscenze acquisito nella loro interpretazione al caso specifico e confrontandolo con le tecniche note di analisi termica.

1.1 Tomografia Elettrica e Tomografia Termica

Il metodo di indagine geoelettrica nella sua configurazione più semplice si realizza attraverso la misura del potenziale elettrico in due precisi punti del terreno, in conseguenza alla circolazione di corrente nel sottosuolo generata mediante l'applicazione di una forza elettromotrice in due ulteriori punti del terreno opportunamente disposti. Variando la geometria dei punti di misura del potenziale e di iniezione della corrente (quadripolo), varia la regione di sottosuolo in cui tale circolazione é significativa, andando a interessare profondità maggiori al crescere della distanza fra gli elettrodi di corrente e quelli di potenziale. Attraverso una modellazione analitica o numerica, a seconda della numerosità delle misure e della natura del sito specifico, si elabora un

modello matematico i cui parametri caratterizzanti, resistività delle celle o degli strati, costituiscono le incognite del problema. L'obiettivo è individuare opportunamente tali parametri in modo che il modello manifesti nella simulazione analitica del fenomeno un comportamento fisico corrispondente a quello sperimentato nelle misure.

Data la sopra accennata equivalenza tra il fenomeno termico e quello elettrico, il primo approccio al tema della tesi è stato quello di operare secondo una metodologia analoga, nei limiti del tecnicamente realizzabile e assimilabile all'indagine elettrica. Una perfetta analogia tra un'indagine di tipo geoelettrico e un'indagine di natura termica prevederebbe:

1. l'iniezione in un mezzo, assimilabile nella modellazione ad un semispazio, di un flusso di calore noto e costante nel tempo;
2. la misura della temperatura in condizioni di equilibrio termico;
3. la modellazione del fenomeno termico adattando, limitatamente alle unità di misura in gioco, gli algoritmi già utilizzati per il problema geoelettrico;
4. l'inversione dei dati con gli algoritmi già messi a punto per il problema geoelettrico.

Tale genere di approccio presenta dei limiti di natura tecnica. Infatti la somministrazione di un flusso di calore noto e predeterminato risulta difficoltoso nei seguenti aspetti:

1. la misura del flusso di calore sarebbe imprecisa con strumenti di misura economicamente accessibili;
2. il flusso di calore, supponendo una trasmissione per conduzione con

una sonda, sarebbe legato al gradiente termico fra provino e sonda, e richiederebbe una modulazione di difficile implementazione pratica;

3. Un'ulteriore sonda di temperatura richiederebbe l'estrazione di una quantità di calore analoga a quella iniettata, richiedendo strumenti in grado di ridurre la temperatura e di estrarre calore in modo controllato.

Per tali ragioni si è escluso di realizzare un'esatta equivalenza mirando piuttosto ad un'analogia di impostazione metodologica. Un primo punto fermo, affinché l'approccio risulti flessibile e praticabile, è quello di ricorrere ad un'energizzazione di tipo passivo, quindi non controllata, in modo tale da poter sfruttare fenomeni che si verificano naturalmente con regolarità, quale ad esempio l'alternanza di riscaldamento e raffreddamento dovuta all'inso-lazione diurna contrapposta all'assenza di irraggiamento della notte. Per il monitoraggio delle temperature si è ovviamente utilizzata la termocamera, operando una sequenza di acquisizioni a intervalli regolari, in modo tale da monitorare l'evoluzione della temperatura nel tempo, sulla superficie del corpo investigato. Tramite il metodo degli elementi finiti, è possibile simulare analiticamente la risposta termica del corpo, analizzare la temperatura superficiale e, tramite un confronto con i valori misurati, operare una correzione sui parametri del modello, fino a raggiungere una buona corrispondenza con le temperature misurate e i risultati del calcolo numerico. Per approfondire questo approccio sono stati eseguiti esperimenti su un modello di muratura in cui erano stati inseriti elementi anomali e un modello riprodotto un sito archeologico.

1.2 Tomografia Sismica e Tomografia Termica

L'ostacolo maggiore incontrato nell'approccio *elettrico* all'analisi del problema si è dimostrato l'amplificazione dell'errore di misura della temperatura al crescere della profondità. Come si è visto, la termocamera misura la temperatura superficiale; come è ovvio, le proprietà del materiale al crescere della distanza dalla superficie influenzano le temperature superficiali in maniera via via minore. Procedendo con tecniche di inversione, effettuando una *back projection* delle temperature sui parametri del modello, un piccolo errore nella misura della temperatura comporta un'amplificazione che aumenta esponenzialmente con la profondità. Volendo ampliare al massimo la profondità di indagine risulta quindi di estrema importanza la precisione della misura. I limiti nella misura della temperatura sono legati allo strumento utilizzato e quindi difficilmente migliorabili. Si è quindi deciso di applicare un approccio in cui la misura della temperatura risultasse di importanza relativa. Operando con onde termiche tale precisione ha un'importanza ridotta, in quanto la precisione riguarda la misura dei tempi piuttosto che delle ampiezze di temperatura. Un approccio basato sulla misura della fase e quindi della velocità di propagazione dell'onda termica, presenta importanti analogie con i metodi sismici di indagine geofisica che, basandosi sulla misura della velocità di propagazione delle onde sismiche, ricavano importanti informazioni sulla geometria di superfici di separazione tra strati e sulle grandezze che esprimono le loro proprietà meccaniche. Un'ulteriore analogia tra indagine termica e sismica è stata realizzata attraverso l'utilizzo di onde termiche. Operando attraverso le onde termiche, la misura della temperatura richiede una precisione elevata piuttosto che nel valore assoluto, nel calcolo della fase e quindi del tempo di propagazione dell'onda.

Per approfondire la fattibilità di un approccio di questo tipo è stato realiz-

zato un modello su cui valutare la fattibilità tecnica ed i risultati conseguibili.

Il modello presenta una sezione in cui sono presenti:

1. uno strato esterno di cartongesso di 4 mm di spessore;
2. uno strato di lana di roccia;
3. uno strato di polistirene estruso;
4. uno strato esterno di cartongesso di 4 mm di spessore.

All'interno dello strato di polistirene estruso sono stati inseriti provini di differenti materiali (legno, pietra, alluminio e PVC) per valutare la fattibilità tecnica di un'analisi termica caratterizzata da:

- configurazione per trasparenza;
- energizzazione termica periodica;
- misura di fase e tempi di arrivo.

La finalità è l'individuazione di un metodo per la determinazione delle proprietà termiche dei materiali e la loro geometria.

Capitolo 2

La Termografia

2.1 Storia

La scoperta della presenza di radiazioni luminose fuori dallo spettro del visibile è relativamente recente: i primi studi di Herschel risalgono al 1800, poco più di 200 anni or sono. La prima intuizione dell'esistenza delle radiazioni luminose è frutto di un fatto accidentale: Sir William Herschel (1738-1822) stava valutando la bontà di diversi filtri per l'osservazione solare al telescopio quando si accorse che alcuni, pur presentando luminosità analoga lasciano passare una quantità di calore significativamente maggiore, al punto di rischiare di danneggiare l'occhio dell'osservatore. Per chiarire la ragione del fenomeno Herschel scompose attraverso un prisma la luce solare nelle sue componenti monocromatiche e, con un termometro a mercurio il cui bulbo era stato verniciato di nero, valutò la quantità di calore che le diverse componenti fornivano. Osservò che le componenti rosso-viola erano quelle che fornivano il maggior apporto di calore; tuttavia si rese conto che posizionando il termometro nella zona scura al di là dello spettro la temperatura continuava ad aumentare fino a raggiungere un massimo. Herschel arrivò quindi alla con-

clusione che pur non essendo visibile esisteva un'ulteriore spettro che chiamò "spettro termometrico". Nel corso degli anni furono sviluppati sistemi più sensibili per la rivelazione della radiazione termica fino alla scoperta, da parte di Nobili, della termocoppia. Macedonio Melloni (1798-1854) creò quindi la prima termopila connettendo in serie diverse termocoppie, raggiungendo una sensibilità 40 volte maggiore di quella raggiunta dal miglior termometro allora esistente. Nel 1840 Sir John Herschel, figlio dello scopritore delle radiazioni infrarosse, realizzò la prima immagine termografica attraverso l'evaporazione differenziale di una patina disposta su un foglio per effetto della radiazione infrarossa focalizzata. Nel 1880 Langley inventò il bolometro, una sottile striscia di platino verniciata di nero collegata su un braccio di un ponte di Wheatstone. La radiazione infrarossa veniva focalizzata sulla striscia e un galvanometro collegato al ponte reagiva allo sbilanciamento del ponte consentendo una misura della radiazione. Fra il 1900 ed il 1920 vi fu un deciso incremento dell'interesse degli inventori per gli infrarossi; in modo particolare durante la guerra del 1914-18 si valutarono diverse applicazioni di natura militare. I sistemi più sensibili messi a punto in questo periodo erano in grado di rivelare la presenza di un aereo a 1.5 km di distanza e di una persona a 300 m. Durante la guerra del 1939-45 fu incoraggiato lo sviluppo di rivelatori di infrarossi ultrasensibili che consentivano di visualizzare un bersaglio nella più completa oscurità. Tali tecnologie rimasero segrete fino al 1950. Da metà del 1950, eliminato il segreto militare, la tecnologia a infrarossi è diventata disponibile agli scienziati, ai civili e all'industria.

2.2 Lo spettro elettromagnetico

Lo spettro elettromagnetico è stato convenzionalmente diviso in funzione della lunghezza d'onda della radiazione. Diversi tipi di onde elettromagnetiche sono stati individuati nel corso dei decenni di ricerca. Essi si differenziano essenzialmente per la loro caratteristica lunghezza d'onda. Una classificazione delle onde elettromagnetiche è proprio in base alla loro lunghezza d'onda. In λ senso decrescente:

1. raggi γ ;
2. raggi X ;
3. raggi ultravioletti;
4. banda del visibile;
5. banda infrarossa;
6. micro onde;
7. onde radio.

La termografia che è la tecnica che consente di evidenziare e misurare a distanza il calore rilasciato dalle radiazioni infrarosse emesse da tutti i corpi caldi, si serve della banda delle radiazioni infrarosse, confinante con lo spettro del visibile a un estremo, oltre la radiazione monocromatica rossa, e con la banda delle microonde dall'altra. La banda delle radiazioni infrarosse è stata a sua volta divisa in *basso infrarosso* ($0.75-3 \mu\text{m}$), *medio infrarosso* ($6-15 \mu\text{m}$), *alto infrarosso* ($15-100 \mu\text{m}$). Essa è divenuta un tipo di ispezione fondamentale in tutti i campi dove non sia possibile effettuare misure di temperatura per contatto. La temperatura di un corpo può essere rilevata,

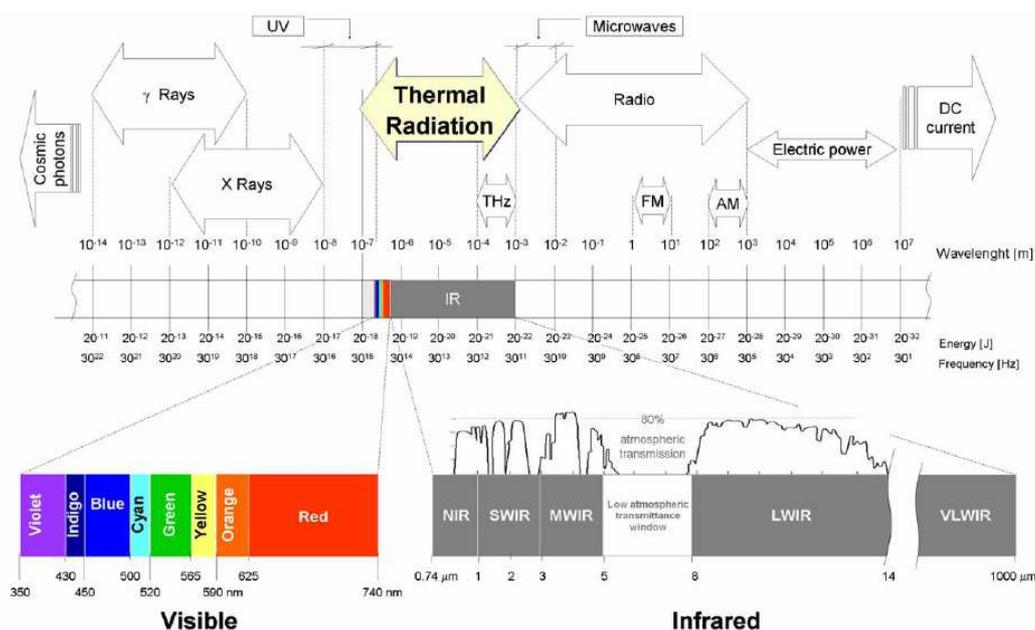


Figura 2.1: Spettro elettromagnetico

senza alcun contatto con lo stesso, attraverso la misurazione della quantità di radiazione infrarossa da esso emessa (Ludwig, 2002). Ogni corpo, infatti, sia esso animato o no, è in grado di emettere dalla propria superficie una radiazione elettromagnetica capace di propagarsi nel vuoto o nei materiali circostanti, grazie all'agitazione termica delle molecole che lo compongono. Le radiazioni infrarosse sono anche dette radiazioni termiche in quanto percepibili sotto forma di calore. Inoltre, dall'analisi delle distribuzioni spaziali e delle variazioni temporali della temperatura ricavate dalle termografie si possono teoricamente ottenere informazioni sulla natura degli elementi presenti in un corpo la cui profondità è però limitata ad uno strato relativamente superficiale. In generale variazioni locali della proprietà termofisiche di un materiale sono considerate *difetti* nello stesso. In seguito alla variazione della temperatura di un corpo che presenti dei difetti è pertanto possibile mettere in evidenza queste alterazioni e definire pertanto la struttura di un corpo ed

eventualmente il suo stato di alterazione o di degrado (Almond & Lau, 1994; Saintey & Almond, 1995).

2.3 Radiazione di corpo nero

Un corpo nero è definito come un corpo capace di assorbire radiazioni che incidono su di esso indipendentemente dalla loro lunghezza d'onda. Tecnicamente un contenitore vuoto in cui sia presente una piccola apertura che comunica con una cavità interna mantenuta a temperatura costante può essere assimilato ad un corpo nero. Le radiazioni che entrano nella cavità subiscono una serie di riflessioni multiple attenuandosi progressivamente e una parte trascurabile dell'energia entrante lascia la cavità attraverso l'apertura. Il comportamento di tale genere di dispositivo può essere assimilato ad un corpo nero. Se un dispositivo di questo tipo viene dotato di un riscaldatore interno che mantiene la temperatura della cavità ad un valore predeterminato si parla di cavità radiante. Tale genere di cavità viene solitamente utilizzata come elemento di riferimento per la taratura di dispositivi di misura in quanto la composizione spettrale della radiazione dipende unicamente dalla temperatura interna della cavità. L'espressione che descrive la radiazione emessa da un corpo nero si deve a Max Planck (1858-1947):

$$W = \frac{2\pi hc^3}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad [W/m^2] \quad (2.1)$$

Dove W rappresenta l'emittanza di corpo nero alla lunghezza d'onda λ , c la velocità della luce, h la costante di Planck, k la costante di Boltzmann, T la temperatura assoluta, λ la lunghezza d'onda. La formula di Planck può essere calcolata per differenti valori di temperatura e consente di determinare una curva che lega l'emittanza spettrale alla lunghezza d'onda. Dall'analisi

di queste curve è possibile individuare la lunghezza d'onda a cui corrisponde l'emittanza massima. La legge di Wien esprime questa relazione nella forma:

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \quad (2.2)$$

in cui λ è espressa in μm e T la temperatura assoluta in $^{\circ}\text{K}$. L'espressione della legge di Plank può essere integrata tra $\lambda = 0$ e $\lambda = \infty$ ottenendo la legge di Stefan-Boltzman che esprime la radianza totale emessa da un corpo nero.

$$W_{tot} = \sigma T^4 \quad (2.3)$$

La formula, ricavata da Josef Stefan (1835-1893) e Ludwig Boltzmann (1844-1906), indica che la potenza totale emessa da un corpo nero W_{tot} è proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura assoluta T .

2.4 Radiazione dei corpi non neri

Quanto visto finora ha validità per un corpo nero. Un corpo nero esiste però solo da un punto di vista concettuale ed un comportamento simile può essere associato solo a dispositivi particolari. Tuttavia i corpi reali si comportano secondo modalità diverse da quelle che caratterizzano un corpo nero. Sono fondamentalmente tre i processi che differenziano un corpo reale da un corpo nero:

1. l'assorbimento non risulta uniforme in tutto lo spettro della radiazione;
2. la radiazione incidente viene parzialmente riflessa in misure dipendenti dalla sua lunghezza d'onda;

3. la radiazione che non viene assorbita o riflessa viene trasmessa attraverso il mezzo.

Si definiscono pertanto:

1. **assorbanza spettrale** α_λ pari al rapporto tra la potenza radiante assorbita e quella incidente;
2. **riflettanza spettrale** ρ_λ pari al rapporto fra la potenza radiante riflessa e quella incidente;
3. **trasmissione spettrale** τ_λ pari al rapporto fra la potenza radiante trasmessa attraverso il mezzo e quella incidente.

L'indice λ indica il fatto che tali grandezze dipendono dalla lunghezza d'onda.

Inoltre vale la relazione:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (2.4)$$

Per un materiale opaco $\tau_\lambda = 0$ pertanto

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1 \quad (2.5)$$

Per poter descrivere la quantità di energia radiante emessa da un oggetto ad una specifica temperatura si definisce il parametro ε_λ dipendente dalla lunghezza d'onda λ pari al rapporto tra la potenza termica emessa da un corpo che si trovi ad una specifica temperatura e quella emessa da un corpo nero che si trovi alla medesima temperatura. Nella generalità dei casi un corpo si definisce:

1. **corpo nero** se $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = 1$;
2. **corpo grigio** se $\varepsilon_\lambda = \varepsilon < 1$;

3. **radiatore selettivo** se $\varepsilon_\lambda = f(\lambda)$.

Per un ottimo riflettore, quale ad esempio uno specchio, $\varepsilon_\lambda \cong 0$ pertanto $\rho_\lambda \cong 1$.

Applicando la formula di Stefan-Boltzmann ad un corpo grigio otteniamo:

$$W = \varepsilon\sigma T^4 \quad (2.6)$$

un corpo grigio, a differenza di un corpo nero, emette un potenza radiante ridotta del fattore ε .

2.5 La misurazione

La termocamera è un strumento di misura sensibile alla radiazione infrarossa. La misura della temperatura è una misura indiretta resa possibile tramite la modellizzazione del caso reale per ricavare la variabile di interesse. Consideriamo un corpo nero disposto a una breve distanza dalla termocamera. Allora se $T_{sorgente}$ è la temperatura della sorgente, essa emetterà l'energia $W = W(T_{sorgente})$. La termocamera rivelerà un segnale in ingresso $U_{sorgente}$ proporzionale all'energia ricevuta:

$$U_{sorgente} = CW(T_{sorgente}) \quad (2.7)$$

con C costante di proporzionalità. Oppure nel caso di corpo grigio:

$$U_{sorgente} = C\varepsilon W(T_{sorgente}) \quad (2.8)$$

Poichè la radiazione infrarossa emessa da un oggetto si trasmette attraverso l'atmosfera, un mezzo semitrasparante alla radiazione infrarossa allora,

tenendo conto di questo fatto e indicando con τ la trasmittanza dell'atmosfera, l'emissione dell'oggetto rilevata dalla termocamera sarà espresso dalla relazione:

$$W_{oggetto} = C\tau\varepsilon W(T_{oggetto}) \quad (2.9)$$

Il corpo grigio considerato, sorgente della radiazione, riflette inoltre la radiazione proveniente dagli oggetti circostanti. Supponendo che questi ultimi si trovino alla temperatura T_{rifl} e che la riflettanza della sorgente sia $1 - \varepsilon$ allora

$$W_{oggetto} + W_{riflessa} = \tau [\varepsilon W(T_{oggetto}) + (1 - \varepsilon) W(T_{riflessa})] \quad (2.10)$$

E' necessario inoltre tenere in considerazione l'emissione dell'atmosfera. Se $(1 - \tau)$ è l'emittanza dell'atmosfera allora introducendo un termine che tenga conto del fenomeno nella formula precedente

$$\begin{aligned} W_{totale} &= W_{oggetto} + W_{riflessa} + W_{atmosfera} = \\ &= \tau\varepsilon W(T_{oggetto}) \\ &\quad + \tau(1 - \varepsilon) W(T_{riflessa}) \\ &\quad + (1 - \tau) W(T_{atmosfera}) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Ponendo

$$\begin{aligned} W(T_{oggetto}) &= W_{oggetto} \\ W(T_{riflessa}) &= W_{riflessa} \\ W(T_{atmosfera}) &= W_{atmosfera} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Semplificando

$$\begin{aligned}
 W_{totale} &= \tau \varepsilon W_{oggetto} \\
 &+ \tau (1 - \varepsilon) W_{rifl} \\
 &+ (1 - \tau) W_{atmosfera}
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

Moltiplicando per la costante C

$$\begin{aligned}
 CW_{totale} &= C\tau\varepsilon W_{oggetto} \\
 &+ C\tau(1 - \varepsilon) W_{riflessa} \\
 &+ C(1 - \tau) W_{atmosfera}
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

Essendo

$$\begin{aligned}
 U_{oggetto} &= CW_{oggetto} \\
 U_{riflessa} &= CW_{riflessa} \\
 U_{atmosfera} &= CW_{atmosfera} \\
 U_{totale} &= CW_{totale}
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

allora

$$\begin{aligned}
 U_{totale} &= \tau \varepsilon U_{oggetto} \\
 &+ \tau (1 - \varepsilon) U_{riflessa} \\
 &+ (1 - \tau) U_{atmosfera}
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

Il segnale in uscita dalla termocamera è U_{totale} ma, poichè la finalità della misura è la determinazione della temperatura dell'oggetto, il segnale di interesse è $U_{oggetto}$ attraverso il quale determinare mediante l'equazione 2.6 il

valore della temperatura.

$$\begin{aligned}
 U_{oggetto} = & \frac{1}{\tau\varepsilon} U_{totale} \\
 & - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} U_{riflessa} \\
 & - \frac{1-\tau}{\tau\varepsilon} U_{atmosfera}
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

In cui:

- $U_{oggetto}$ rappresenta la temperatura che misurerebbe la termocamera per un corpo nero di temperatura $T_{oggetto}$;
- U_{totale} è il valore misurato dalla termocamera per il caso specifico;
- $U_{riflessa}$ è la tensione di uscita teorica per un corpo nero alla temperatura $T_{riflessa}$;
- $U_{atmosfera}$ è la tensione di uscita per un corpo nero alla temperatura $T_{atmosfera}$.

La trasmittività dell'atmosfera (τ) può essere calcolata nota la temperatura ($T_{atmosfera}$), l'umidità relativa (u_{rel}) e la distanza dell'oggetto (d). Da questi quattro parametri è possibile ricavare $U_{atmosfera}$ servendosi dell'equazione (2.6) e (2.7). Con le medesime equazioni e la temperatura effettiva dell'area circostante l'oggetto o la temperatura ambientale riflessa ($T_{riflessa}$) è possibile ricavare il valore di $U_{riflessa}$. Il valore U_{totale} rivelato dalla termocamera e ε , emissività dell'oggetto inquadato, consentono infine di ricavare il valore di temperatura dell'oggetto mediante l'espressione:

$$T = \sqrt[4]{\frac{U_{oggetto}}{C\sigma}} \tag{2.18}$$



Figura 2.2: Termocamera FLIR Thermocam P25 con accessori

Quindi i parametri necessari per la misura della temperatura, oltre al segnale rilevato della termocamera, sono:

1. $T_{atmosfera}$: temperatura atmosferica;
2. u_{rel} : umidità relativa;
3. d : distanza dell'oggetto dall'obiettivo della termocamera;
4. $T_{riflessa}$: temperatura riflessa.

Tali parametri vengono impostati nella termocamera per calcolare indirettamente il valore di temperatura a partire dal segnale misurato dalla termocamera. Questi consentono al software “embedded” nella termocamera di operare i calcoli necessari alla determinazione della temperatura registrata nei file che contengono i termogrammi.

2.6 La termocamera

Il dispositivo di misura per l'esecuzione della termografia è la termocamera che nel corso degli anni ha subito una continua evoluzione. La termocame-

ra a infrarossi Flir Systems ThermaCAM P25 (fig. 2.2) é un dispositivo di nuova generazione. Tale dispositivo é nelle sue parti essenziali analogo a una camera per riprese fotografiche ma a differenza di questa é sensibile non allo spettro della luce visibile ma alla radiazione infrarossa emessa da un oggetto. Poiché la radiazione infrarossa emessa é proporzionale alla temperatura della superficie di un oggetto, la termocamera é in grado di visualizzare e di misurare tale temperatura. Le immagini termiche ottenute possono essere visualizzate direttamente sullo strumento, memorizzate su un dispositivo di archiviazione allo stato solido (scheda di memoria Compact-Flash) oppure trasmesse a un personal computer opportunamente collegato tramite le interfacce seriale, USB o IEEE1394. La ditta produttrice, FLIR System, ha percorso una strada di perfezionamento nel settore dell'imaging infrarosso che l'ha vista protagonista dal 1965, quando é stato messo a punto il primo sistema termografico per la manutenzione predettiva, di una continua evoluzione del prodotto. L'elaborato chiave di una acquisizione termografica é la termografia, analoga a una fotografia tradizionale per quanto riguarda l'aspetto, presenta la peculiarità di visualizzare il campo visivo in falsi colori rappresentativi della temperatura delle superfici inquadrature, con una corrispondenza colore-temperatura dipendente dalla specifica scala di colori scelta dall'operatore a seconda della circostanza.



Capitolo 3

Lo stato dell'arte

3.1 Campi di applicazione

I metodi termici sono utilizzati in diversi campi di indagine:

- ambiente e territorio;
- costruzioni;
- architettura;
- beni Culturali.

3.1.1 Ambiente e Territorio

La prospezione geotermica rappresenta una ben nota metodica di indagine geofisica fondata sul fatto che il terreno presenta naturalmente un gradiente termico in funzione della profondità. La temperatura misurata nelle miniere e nei fori di sonda tende infatti ad aumentare con la profondità confermando l'esistenza di un flusso di calore che si propaga dall'interno verso la superficie. Esiste inoltre una oscillazione ciclica nella temperatura superficiale legata

all'alternanza di giorno e notte e all'alternanza delle stagioni che si evidenzia in superficie ma si riflette a profondità variabili legate alla diffusività termica del suolo e al periodo dell'oscillazione di temperatura (Sharma, 1997).

Fin dal 1862 Kelvin valutó la possibilità di calcolare la diffusività termica degli strati superficiali del suolo attraverso l'analisi dell'oscillazione armonica di temperatura ottenendo una perfetta corrispondenza con i valori di diffusività ottenuti attraverso la misura di ampiezza e fase della prima armonica dell'oscillazione di temperatura (Kelvin, 1862).

Recentemente un approccio analogo è stato adottato a immagini radiometriche nello spettro dell'infrarosso termico ricavate dai dati trasmessi dal satellite NOAA/AVHRR per ricavare il contenuto d'acqua del suolo attraverso lo studio dell'inerzia termica sotto l'azione dell'irraggiamento solare (Wang *et al.*, 2004).

Evidenziando le anomalie nella distribuzione delle temperature superficiali causate da un'alterazione locale delle caratteristiche termiche dei suoli o alla presenza di attività geotermica (Cassinis & Lechi, 1947). Altre applicazioni hanno interessato:

- l'individuazione di faglie (Sharma, 1997);
- il monitoraggio di slavine e frane (Zilioli, 1979a; Zilioli, 1979b);
- il monitoraggio dell'attività vulcanica (Brivio *et al.*, 1989);
- l'efficienza energetica (Espositi, 1982; UNI, n.d.a);
- la caratterizzazione delle parti costituenti le discariche RSU (Zilioli *et al.*, 1992);
- la localizzazione di perdite in reti di trasporto di gas e liquidi (Wolff & Zassr, 1978);

- l'individuazione di strutture archeologiche (Slater, 1980).

Negli ultimi decenni sono state condotte con successo prospezioni termiche ad infrarossi realizzate principalmente con scanner ad infrarossi aereotrasportati (Slater, 1980). Durante le ore precedenti al sorgere del sole la temperatura superficiale è legata principalmente all'inerzia termica dei materiali superficiali (Wang *et al.*, 2004). In questa maniera è stato possibile individuare sorgenti di acqua calda e regioni a temperatura superficiale superiore alla media. La produzione scientifica finalizzata all'applicazione della termografia ad infrarossi in campo geotermico è scarsa, principalmente perchè le metodiche geotermiche si concentrano principalmente su anomalie termiche a scala regionale con misure realizzate in fori di sonda poco profondi (da i 2 ai 5 metri) con misure che non si basano sulla termografia ad infrarossi.

3.1.2 Costruzioni

Fin dall'introduzione della prima termocamera ad infrarossi nel 1965 diversi ricercatori si sono interessati all'applicazione nel campo dell'industria delle costruzioni del metodo termografico. La crisi energetica del 1973 ha evidenziato un sensibile incremento della domanda di applicazioni legate all'efficienza energetica degli edifici (Espositi, 1982). In seguito il campo di interesse si è allargato all'individuazione di umidità nelle murature (Accardo *et al.*, 1984; Caneva *et al.*, 1988; Milazzo *et al.*, 1998) nell'analisi di stabilità dei monumenti (Luciani & Mocchegiani, 1980; Brivio *et al.*, 1994; Avdelidis & Moropoulou, 2004; Grinzato, 2002), all'individuazione di difetti strutturali nelle costruzioni civili (Seracini & Ruffa, 1983; Schickert, 1985; Brink *et al.*, 2002; Luprano *et al.*, 2006; UNI, n.d.b), nelle coperture di costruzioni, nelle strade e negli impalcati dei ponti (Weil, 1998; Benko, 2002; Wood & Four Star Cleaning and Restoration, Inc., 2004), nelle costruzioni e materiali del-

le industrie (Cielo *et al.*, 1987). Più recentemente le tecniche termografiche sono state applicate all'individuazione di perdite e malfunzionamenti in impianti elettrici, idraulici ed opere di impermeabilizzazione o addirittura alla composizione architettonica (Rosina *et al.*, 2004). Sintetizzando l'utilizzo dei metodi termografici nel campo delle costruzioni civili é legato a:

1. studio della prestazione energetica;
2. individuazione di umidità e perdite in murature e coperture;
3. individuazione di difetti strutturali di costruzioni, strade e ponti;
4. individuazione di impianti ed elementi strutturali celati all'interno di elementi murari.

La misura della temperatura superficiale tramite la termografia infrarossa consente di operare con speditezza diverse azioni diagnostiche sulle opere delle costruzioni edilizie. Parlando di temperatura appare spontaneo associare tale genere di indagine allo studio della prestazione energetica di un organismo edilizio. Analisi che può essere agevolmente e speditamente anche su superfici ampie consentendo di individuare da un punto di vista qualitativo la presenza di elementi di criticità nell'isolamento termico, quale la carenza di materiale coibente o la presenza di ponti termici. La metodica consente inoltre di valutare, sotto l'aspetto quantitativo, la conduttanza termica, principale grandezza pratica coinvolta nella progettazione e nell'analisi del fenomeno, uniformando la temperatura interna e misurando la temperatura esternamente con l'ausilio della termografia infrarossa. Noto il flusso di calore è infatti possibile calcolare la conduttanza termica.

Un'ulteriore applicazione riguarda l'individuazione di umidità in elementi murari, coperture e strutture in genere. La presenza di acqua all'interno

dei materiali da costruzione comporta infatti un'alterazione delle proprietà termiche del materiale, alterazione che può essere efficacemente evidenziata mediante la termografia infrarossa operando principalmente con due differenti approcci. Una metodica si basa sul fatto che la presenza di acqua incrementa la capacità termica del materiale rallentando tanto il fenomeno di riscaldamento quanto il raffreddamento che avviene naturalmente per effetto dell'escursione termica provocata dall'alternanza di giorno e notte. Operando quindi un rilievo termografico, preferibilmente durante la notte, è possibile evidenziare le regioni di interesse. Un ulteriore approccio si basa sul fatto che la presenza di acqua all'interno del materiale incrementa la conduttanza termica. Imponendo un riscaldamento dell'ambiente si crea un determinato gradiente termico fra la superficie interna ed esterna dell'elemento investigato. La presenza di acqua è quindi evidenziabile come un'anomalia a temperatura superiore rispetto alla temperatura media dell'elemento (Carslaw & Jaeger, 1946; Wood & Four Star Cleaning and Restoration, Inc., 2004).

L'individuazione e la localizzazione dei elementi impiantistici celati all'interno di partizionamenti interni o elementi strutturali è legata alla generazione di un opportuno gradiente termico. Gradiente termico che può essere agevolmente individuato in superficie da una termografia. La generazione del contrasto di temperatura è banale nel caso di impianti in cui circolano liquidi o gas in temperatura, quali ad esempio le tubazioni che trasportano acqua calda per uso sanitario o per la climatizzazione degli ambienti.

Recentemente è stata efficacemente verificata l'applicabilità delle tecniche di indagine termografica alle strutture in cemento per l'individuazione dei vuoti nelle pavimentazioni stradali, nei ponti, nei muri e nei solai degli edifici (Weil, 1998; ASTM, n.d.) e nella caratterizzazione di difetti nelle strutture civili rinforzate con fibrocompositi (Luprano *et al.*, 2006).

L'individuazione di fratture celate in elementi metallici dell'industria delle costruzioni prevede l'utilizzo di una sollecitazione sonica dell'elemento per evidenziare il riscaldamento prodotto dall'attrito che il movimento relativo dei lembi della frattura genera per effetto del passaggio dell'onda elastica associata all'onda sonica (Cawley *et al.*, 2006).

3.1.3 Architettura

La principale applicazione termografica all'architettura (Rosina *et al.*, 2004; Seracini, 1981) è finalizzata all'individuazione di elementi morfologici dell'organismo edilizio non riscontrabili attraverso una semplice ispezione visiva. Sfruttando la risposta termica differente dei diversi materiali da costruzione è possibile riconoscere la presenza e la tipologia di elementi funzionali non noti, celati alla vista da intonaci o paramenti sovrastanti operando a distanza e in maniera non distruttiva. La termografia rende infatti riconoscibili elementi strutturali quali pilastri, travi, travetti di solai laterocementizi, archi incorporati all'interno di murature, catene.

- individuazione degli elementi costituenti l'edificio;
- mappatura del degrado;
- applicazioni predittive.

L'applicazione della tecnica agli elementi in muratura consente di individuare innanzitutto la tessitura della stessa e quindi di riconoscere la tipologia di conci utilizzati. Sotto un'opportuna sollecitazione termica, a volte è sufficiente il carico termico conseguente all'insolazione, mentre altre volte è necessario ricorrere ad energizzazione artificiale. È possibile inoltre riconoscere la sagoma dei conci e la forma, individuando il contrasto termico presente in

corrispondenza dei giunti. Si può effettuare inoltre la distinzione tra mura-
ture in conci e murature realizzate in pietrame in quanto la malta presenta
usualmente una risposta termica decisamente differente rispetto al pietrame.
La capacità dell'immagine termica di evidenziare i giunti consente inoltre di
riconoscere la presenza di un ammorsamento delle differenti murature ren-
dendo possibile il riconoscimento di elementi semplicemente addossati da
elementi che opportunamente ammorsati risultano parte integrante degli ele-
menti staticamente efficaci. Le tecniche termografiche consentono quindi
di fornire suggerimenti, conferme o smentite alla ricostruzione storica del-
l'edificio consentendo di riconoscere i materiali e le tecniche costruttive che
differenziano i diversi elementi murari, riconoscendo quindi quelli riferibili
al medesimo periodo storico. Sempre in quest'ottica è possibile riconoscere
l'efficacia della tecnica nell'individuazione di tamponature a chiusura di luci
precedentemente presenti, nel riconoscimento di intercapedini tra elementi
murari, cavedi e canne fumarie.

Le applicazioni all'architettura non si limitano unicamente agli elementi
in muratura; esistono infatti significative applicazioni anche alle strutture
realizzate in legno, di grande interesse nello studio delle coperture di antiche
costruzioni. Il ricorso al legno nell'edilizia civile è frequente nei paesi carat-
terizzati da clima rigido e abbondanza di materia prima. In particolare, in
occasione di restauri o risanamenti conservativi può presentarsi la necessità
di riconoscere la geometria dei singoli elementi lignei che costituiscono un
assito, realizzato solitamente con una orditura principale di elementi di se-
zione maggiore su cui vengono chiodati listelli di spessore ridotto a formare
una chiusura piana con l'eventuale presenza, a seconda del caso, di orditu-
re secondarie o controventamenti. Il legno è termicamente caratterizzato da
una scarsa conducibilità termica, specialmente se confrontato con gli altri

materiali da costruzione; ciò tuttavia non impedisce il ricorso alla tecnica termografica, a condizione di ricorrere ad un'opportuna energizzazione, mediante un flusso di calore significativo che, difficilmente, può limitarsi all'irraggiamento solare, ma può essere ottenuto mediante l'utilizzo degli impianti di riscaldamento usualmente presenti in tutti gli edifici di recente costruzione. Le analisi possono riguardare sia le strutture orizzontali consentendo di rilevare travi primarie e secondarie e perfino i singoli listelli dell'assito che costituiscono lo strato di aggrappo dell'intonaco, che gli elementi di chiusura verticali consentendo di riconoscere la presenza di eventuali ossature in legno, o la presenza di conci murari e la sua eventuale tessitura nonché la presenza di elementi di consolidamento strutturale quale la presenza di catene lignee (Ludwig, 2002).

Gli elementi metallici infine sono sovente presenti negli edifici di natura storica quale elemento spesso più di presidio che strutturale, ma spesso di notevole importanza in quanto capaci di limitare il degrado in caso di futuri dissesti. Tuttavia tali elementi risultano spesso, per ragioni più estetiche che funzionali, occultati alla vista all'interno di tramezzature o al di sotto di intonaci, e la verifica del loro grado di conservazione richiede interventi costosi e distruttivi.

3.1.4 Beni Culturali

Giustamente M. Oddone (2006) (Oddone, Anno Accademico 2005-2006) fa osservare che le esperienze con termovisione fino ad oggi condotte sono collocabili poco più che in un'infanzia della sperimentazione di tale tecnica.

Particolare interesse è stato rivolto alle forme di degrado legate alla presenza d'acqua nei materiali edili, specialmente per lo studio del degrado di dipinti murari, dovuta principalmente al passaggio allo stato di vapore del-

l'acqua di imbibizione e al conseguente deposito di sali negli strati più esterni della muratura (Carlomagno & Meola, 2002; Castellano *et al.*, 2002; Ludwig *et al.*, 1995; Ongaro & Berardi, 1982).

Uno sforzo notevole è stato condotto per esprimere quantitativamente il flusso evaporativo in funzione del raffreddamento relativo misurato. Le murature prese in considerazione sono principalmente quelle di edifici monumentali di alto valore storico, caratterizzate da un elevato spessore e quindi da un inerzia termica tale da poter considerare trascurabile il contributo del fenomeno di alternanza ciclica di riscaldamento e raffreddamento, che invece assume un peso significativo nelle murature delle abitazioni civili, rispetto al flusso termico causato dal fenomeno evaporativo. Esprimendo il bilancio termico del sistema muratura-ambiente circostante è possibile calcolare il flusso evaporativo in funzione del raffreddamento misurato sulla superficie. Tale genere di analisi consente di ottenere risultati quanto meno confrontabili con quelli ottenuti attraverso metodi di misura distruttivi basati su pesatura e confronto del campione secco.

La termografia a infrarossi risulta un ottimo metodo diagnostico per valutare la bontà delle condizioni microclimatiche dei siti che ospitano opere e che a volte sono essi stessi opere d'arte. Materiali quali legno, avorio, pergamene sono estremamente sensibili a variazioni di umidità e di temperatura. I metalli subiscono l'effetto dell'ossidazione e della corrosione. Il riscaldamento invernale degli edifici può costituire uno stress tremendo per queste opere e la termografia ad infrarossi costituisce una tecnologia efficiente per valutare speditivamente l'ottimizzazione dell'impianto; con questa tecnica è infatti possibile valutare il gradiente termico fra pavimentazione e copertura, valutare il vapore assorbito dalle murature, arredi e decorazioni (Meola & Carlomagno, 2004).

E' recente l'applicazione di tecniche termografiche attive nella diagnosi delle opere d'arte (Carlomagno & Meola, 2002; Brivio *et al.*, 1993). Tali tecniche sono state messe a punto e perfezionate per i controlli non distruttivi di elementi dell'ingegneria aereospaziale, costituiti prevalentemente da materiali metallici, quindi con proprietà termiche ben lontane da quelle dei materiali utilizzati nelle opere d'arte e solitamente sottoposti a un trattamento superficiale di verniciatura con prodotti a emissività termica nota, trattamenti neppure ipotizzabili per le opere d'arte.

I metodi attivi Pulsed Thermography (PT) e Lockin Thermography (LT) illustrati nel seguito, rivelano la risposta in fase o ampiezza dell'onda termica conseguente ad una opportuna stimolazione termica, rispettivamente impulsiva e armonica. Le usuali tecniche di energizzazione prevedono l'utilizzo di apposite lampade o emettitori di aria calda per ottenere l'effetto di riscaldamento previsto.

Un approccio di questo genere è opportuno nel caso di interventi su elementi di dimensione limitata e sono stati condotti esperimenti su modelli realizzati per la valutazione dell'applicabilità di tali tecniche su affreschi e supporti di marmo, mattoni e tufo (Carlomagno & Meola, 2001). I risultati hanno mostrato punti di forza e debolezza delle differenti metodiche. La tecnica PT è stata in grado di individuare informazioni riguardo le dimensioni, la profondità e la resistenza termica dei difetti attraverso il processamento del segnale. La bontà dei risultati può però essere inficiata da variazioni locali di emissività termica e da un riscaldamento non uniforme che possono ridurre la visibilità dei difetti. E' stato accertato che l'uniformità del riscaldamento può essere ottimizzata con un riscaldamento laterale delle opere per mezzo di una lampada semovente che trasla sul manufatto ispezionato a condizione però di conoscere con precisione le proprietà termiche del materiale

attraverso una fase propedeutica all'indagine vera e propria per la messa a punto dei parametri che interessano la velocità della lampada e l'intensità dell'esposizione.

La tecnica LT è risultata insensibile a un riscaldamento non uniforme e alle variazioni locali di emissività, consentendo anch'essa di evidenziare le caratteristiche salienti dei difetti presenti nel manufatto. In particolare è stato possibile riconoscere i dettagli degli spessori superficiali di intonaco, informazione particolarmente utile in interventi di risanamento su opere che sono state sottoposte a precedenti interventi di restauro. L'indagine LT richiede tuttavia di un maggiore tempo per l'esecuzione delle prove e gli apparati commerciali prevedono solitamente un periodo di energizzazione troppo breve per evidenziare i difetti più profondi. Si ricorda infatti che la profondità di penetrazione di un'onda termica dipende dalla lunghezza d'onda e che a un periodo maggiore corrisponde una maggiore lunghezza d'onda.

Una tecnica di recente messa a punto, la Pulsed Phase Termography (PPT), risulta un compromesso tra la PT e la LT. Pur utilizzando per l'energizzazione un impulso termico, con i relativi vantaggi in termini di velocità di acquisizione, effettua un'elaborazione e un processamento dei dati analogo a quello della LT lavorando nel dominio di frequenze e ottenendo l'ampiezza e la fase per le diverse frequenze. Questo *modus operandi* richiede però un sensibile contrasto termico e quindi un'energizzazione più intensa. In un contesto come quello relativo alle opere d'arte un eccessivo riscaldamento può causare un danneggiamento della stessa, ragion per cui la metodica che ha offerto i migliori risultati è stata quella LockIn.

Le metodiche attive cosè come descritte risultano applicabili principalmente in laboratori appositamente attrezzati, o in cantiere, a condizione di avere lo spazio e il tempo necessario all'esecuzione delle prove. Per indagi-

ni su superfici estese disposte all'esterno degli edifici in cui la superficie da monitorare è notevole e magari rivestita con opere di pregio (per es. rivestimenti artistici, mosaici, etc.), la tecnica termografica attiva non può essere implementata facendo ricorso a un'energizzatore a lampada, se non a costo di severe limitazioni logistiche, il montaggio di un ponteggio opportunamente schermato dall'irraggiamento solare, e la necessità di operare a rotazione su superfici limitate. In questo caso è stata valutata la possibilità di sfruttare un'energizzazione di origine solare monitorando la risposta termica al termine di un periodo di insolazione prima del passaggio in ombra dell'elemento stesso. Nel 1992 (Carlomagno & Meola, 2001) questa applicazione è stata sperimentata sul mosaico che riveste alcuni muri esterni dell'edificio principale della facoltà di ingegneria dell'Università di Napoli, consentendo di rilevare la presenza delle parti del mosaico in cattive condizioni e bisognose di un intervento di restauro.

Tecniche termografiche attive sono anche state applicate con successo alla diagnosi in situ degli affreschi del Duomo di Sarno nell'ambito del programma di recupero conseguente l'alluvione del 1998. In questo caso l'immagine di fase ha consentito di individuare aree dell'affresco sottoposte ad un precedente intervento di restauro e variazioni nello spessore della pittura. L'immagine termografica dell'ampiezza ha consentito invece l'individuazione di distacchi e vuoti.

Capitolo 4

Metodi Termografici attivi

4.1 Classificazione

I metodi termografici attivi prevedono l'utilizzo di una stimolazione termica del materiale sotto esame. Una classificazione delle differenti tecniche di indagine termografica attiva é eseguita proprio tenendo conto del tipo di stimolazione in:

- pulsed Thermography (PT);
- stepped Heating Thermography (LPT);
- lockin Thermography (LT);
- vibrothermography (VT).

La trasmissione di calore al materiale in prova può avvenire mediante un impulso termico di breve durata configurando in questo caso una termografia pulsata (PT). Prolungando la durata dell'impulso si passa a una termografia di tipo Stepped Heating Thermography o Long Pulse Thermography. Quando invece l'energia termica non viene rilasciata in forma impulsiva ma

con andamento periodico a frequenza predeterminata si parla di termografia Lockin (LT), infine quando il calore è generato in forma indiretta attraverso vibrazioni meccaniche si parla di vibrotermografia (VT).

4.2 Termografia Pulsata

La termografia pulsata consiste nel riscaldare con un impulso termico intenso e di breve durata il materiale sotto esame e nel monitorare l'evoluzione temporale della temperatura superficiale del provino. Fisicamente il fenomeno è legato alla propagazione per conduzione del fronte termico all'interno del materiale, congiuntamente agli effetti secondari di convezione e irraggiamento che si verificano all'interfaccia provino-aria. Solitamente l'impulso termico viene trasmesso sulla medesima superficie su cui viene eseguita l'acquisizione termografica e la presenza di anomalie causa in prossimità di esse un'alterazione del fronte di propagazione del calore, comportando la generazione di un contrasto di temperatura sulla superficie circostante evidenziabile nell'immagine termica come aree a temperatura differente rispetto alle regioni circostanti. Il fronte di calore avanza nel materiale con una velocità legata alla diffusività del materiale α , quindi iniziando l'acquisizione di immagini termiche immediatamente al cessare dell'impulso con una prefissata cadenza temporale, le prime immagini riveleranno le anomalie più superficiali e, col trascorrere del tempo, le immagini successive quelle maggiormente profonde. Un impulso di breve durata può essere assimilato alla funzione Delta di Dirac, considerando un semispazio isotropo, la soluzione del problema termodinamico è dato da (Carslaw & Jaeger, 1946):

$$T(z, t) = T_0 + \frac{Q}{\sqrt{k\rho C\pi t}} e^{-\frac{z^2}{4\alpha t}} \quad (4.1)$$

Il tempo di osservazione t è in prima approssimazione una funzione del quadrato della profondità z mentre la perdita di contrasto c è proporzionale al cubo della profondità (Cielo *et al.*, 1987).

$$t \cong \frac{z^2}{\alpha} \quad (4.2)$$

con

$$c \cong \frac{1}{z^3} \quad \alpha = \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (4.3)$$

La metodica così descritta, con applicazione del calore e registrazione dei termogrammi sulla stessa superficie, viene detta comunemente per riflessione. Essa ha una buona risoluzione ma una ridotta capacità di penetrazione. Disponendo invece sorgente termica e rivelatore termico su lati opposti del provino si realizza una termografia per trasparenza che consente una maggiore penetrazione ma una risoluzione inferiore in quanto la maggiore distanza percorsa dal fronte termico rende i termogrammi maggiormente sfumati e con un inferiore contrasto. La tecnica base prevede la possibilità di varianti sulla tecnica di riscaldamento che può essere puntuale (con un raggio laser o una lampada focalizzata sul provino), lineare (utilizzando una lampada ad infrarossi, un filo caldo, o una linea di getti d'aria calda), o superficiale (con proiettori cinematografici, lampade a incandescenza, lampade flash, o scansione laser veloce). L'analisi termografica pulsata consente quindi di ricavare un'indicazione della presenza di difetti nel materiale tramite la ricerca di anomalie nella distribuzione di temperatura e ottenere quindi un'indicazione approssimativa della profondità dell'anomalia a seconda del tempo a cui corrisponde il massimo contrasto di temperatura. Si tratta di una metodica

estremamente veloce ma l'interpretazione dei risultati può essere considerata più qualitativa che quantitativa.

4.2.1 Termografia Pulsata LP

La tecnica termografica pulsata LP utilizza impulsi di riscaldamento di inferiore intensità rispetto alla termografia PT ma di durata molto maggiore. L'analisi quindi non si concentra sul ramo discendente della curva tempo-temperatura ma sulla parte crescente della curva durante la fase di riscaldamento conseguente la somministrazione termica, realizzata mediante la scansione di un fascio laser.

4.2.2 Termografia Pulsata di fase PPT

L'impulso di breve durata della termografia pulsata può essere assimilato da un punto di vista matematico ad un impulso di Dirac e come tale può essere analizzato nel dominio della frequenza, evidenziandone la composizione spettrale. L'avanzamento del fronte d'onda conseguente all'impulso può quindi essere scomposto in una serie di onde termiche a differente frequenza, che si propagano nel provino. Tale considerazione ha ispirato una variante alla tecnica della termografia pulsata chiamata Pulsed Phase Thermography (PPT) che, analoga per tecnica di energizzazione alla termografia pulsata, analizza separatamente le varie frequenze che compongono l'impulso termico. Richiamando la teoria delle onde termiche, poichè la riduzione di ampiezza che un'onda termica subisce durante la sua propagazione è proporzionale alla sua lunghezza d'onda, è possibile affermare che le componenti dell'impulso di minore lunghezza d'onda, subendo una rapida attenuazione all'avanzare nel materiale, subiranno l'influenza di anomalie presenti nelle regioni più superficiali, mentre quelle a maggiore lunghezza d'onda di anomalie presenti

nelle regioni più profonde. Poichè la lunghezza d'onda è legata alla frequenza dalla velocità di propagazione dell'onda e quest'ultima alla diffusività del materiale, in un mezzo omogeneo la scomposizione del fenomeno termico nelle sue componenti nel dominio della frequenza consente di esaltare gli effetti di onde che interessano profondità differenti e quindi ricavare importanti informazioni circa la profondità dell'anomalia.

4.3 La termografia Lockin

La termografia Lockin è caratterizzata da un'energizzazione realizzata mediante un'onda termica a carattere periodico sinusoidale con frequenza predeterminata e deve il suo nome al tipo di amplificatore utilizzato per estrarre le informazioni necessarie all'analisi nella configurazione puntuale. La strumentazione necessaria all'energizzazione è costituita, nella maggioranza dei casi, da proiettori cinematografici o lampade ad incandescenza, la cui modulazione alla frequenza richiesta è realizzata o da sistemi elettronici che ne pilotano l'alimentazione o con strumenti meccanici che parzializzano la fonte luminosa. Si tratta di una tecnica per riflessione in cui l'acquisizione dei termogrammi e la sollecitazione termica avvengono sulla medesima superficie del provino. Un'onda termica che si propaghi nel materiale dalla superficie verso le regioni a maggiore profondità in presenza di anomalie, viene riflessa indietro verso la superficie. La legge fisica che governa la propagazione dell'onda nel materiale prevede la presenza di un ritardo di fase durante l'avanzamento del fronte d'onda proporzionale alla distanza percorsa dalla sorgente, con costante di proporzionalità legata alla diffusività del materiale. L'onda riflessa dalle anomalie osservabile in superficie subisce quindi uno sfasamento legato alla distanza percorsa, oltre un'attenuazione, e si somma in superficie

all'onda energizzante. Il segnale rivelato dalla termocamera corrisponde pertanto a tale somma e presenterà rispetto al segnale energizzante - l'intensità dell'impulso luminoso - uno sfasamento e una variazione di ampiezza legata alla presenza di eventuali riflessioni.

4.3.1 Informazioni ricavabili

Dall'analisi dei termogrammi è possibile ricavare per ciascun pixel dell'immagine tre informazioni significative:

- il valore di temperatura media;
- l'ampiezza dell'onda termica;
- la fase dell'onda termica.

Temperatura media

Il valore di temperatura media consente di ricostruire il termogramma corrispondente alla risposta del provino a un'energizzazione di intensità pari alla media dell'oscillazione periodica, esprimendo quindi la componente continua del fenomeno. Il suo equivalente fisico è quindi assimilabile ad una somministrazione di energia termica con un tasso costante. Esso presenta quindi un'evoluzione temporale analoga a quella della termografia pulsata LP, e presenta un andamento temporale asintotico verso una situazione di stazionarietà dopo l'esaurimento del fenomeno transitorio iniziale. In ultima analisi esso fornisce un'immagine della distribuzione di potenza termica emessa evidenziandone la mancata uniformità.

Ampiezza dell'onda termica

In condizioni di stazionarietà dopo il transitorio iniziale, in assenza di anomalie, l'onda termica generata in superficie, si propaga nel materiale attenuandosi e vedendo quindi la sua ampiezza decrescere con l'aumentare della distanza dalla superficie (fenomeno noto come "geometrical spreading"). Dove invece sono presenti anomalie al di sotto della superficie, una parte dell'energia dell'onda termica viene riflessa verso la superficie, si somma all'onda originaria alterandone il contenuto energetico e quindi l'ampiezza. A parità di profondità un materiale con un'elevata diffusività causerà una minore attenuazione dell'onda che vi si propaga, l'energia riflessa da un'eventuale difetto risulterà quindi maggiore che non in presenza di difetti analoghi ma in materiali a minore diffusività e i suoi effetti sull'ampiezza rivelata dai termogrammi risulterà maggiore. L'immagine di ampiezza dell'onda termica esprime quindi la variabilità locale di diffusività.

Fase dell'onda termica

Come noto l'avanzare del fronte termico di un'onda all'interno di un materiale causa un ritardo di fase proporzionale alla distanza percorsa e quindi, a seconda della velocità, al tempo necessario per il verificarsi del fenomeno. La variazione di fase dell'onda termica risulta pertanto proporzionale a questo valore e consente di stimare la profondità dei difetti che generano le anomalie evidenziate dall'immagine di fase.

4.3.2 Durata dell'analisi

Così come descritto per la termografia pulsata PPT, esiste una relazione tra la frequenza di un'onda termica e la distanza massima che tale onda percorre

in un dato mezzo prima di subire un'attenuazione tale da rendere trascurabili i suoi effetti. La frequenza dell'onda termica energizzante utilizzata nella termografia Lockin influenza la profondità di indagine, la sua risoluzione, e conseguentemente la durata delle misure. Per realizzare una termografia Lockin è quanto meno necessario che si realizzi un periodo completo, il primo ciclo risente però del transitorio iniziale, risulta pertanto preferibile prolungare la durata ad alcuni cicli. Una misura effettuata ad 1 Hz richiederà una durata di misura minima di 1 s, ad una frequenza di 0,1 Hz richiederà almeno 10 s e così via. Se si realizzano misure puntuali ricorrendo all'energizzazione laser sarà necessario ripetere la misura per il numero di punti dell'immagine. Operando invece con un'illuminazione sull'intera superficie di misura e rilevando la temperatura con una termocamera ad infrarossi il tempo necessario è notevolmente inferiore, anche tenendo presente che la termografia lockin in particolar modo per quanto riguarda le misure di fase, risente molto meno di disuniformità di illuminazione rispetto alle altre tecniche, consentendo di operare su superfici anche molto ampie, fermo restando le limitazioni di risoluzione spaziale legate alla risoluzione del dispositivo di acquisizione termica.

4.3.3 Analisi quantitativa

Recentemente la ricerca si è concentrata nel tentativo di risolvere quantitativamente il problema della termografia lockin. Sono stati implementati metodi inversi di soluzione che consentono, data la diffusività α del provino e la frequenza ω_b alla quale l'anomalia diventava visibile, di ricavare la profondità z del difetto con formulazioni del tipo:

$$z = K \sqrt{\frac{\alpha}{\pi \omega_b}} \quad (4.4)$$

Il termine K corrisponde ad una costante di correlazione che assume i valori:

- $K = 1$ per i dati ampiezza;
- $1.5 < K < 2$ per la fase.

Con approccio analogo si è inoltre dimostrata la possibilità di ricavare la diffusività α del provino nota la frequenza ω_b alla quale un difetto appositamente disposto sul lato cieco del provino risultava visibile. Dalla formula precedente:

$$\alpha = \pi \omega_b \left(\frac{L}{K} \right)^2 \quad (4.5)$$

in cui L corrisponde allo spessore del provino.

4.4 Vibrotermografia

L'idea che ha ispirato la vibrotermografia si deve al fisico tedesco W.E. Weber (1804-1891), il quale ha scoperto che un'incremento di lunghezza di un materiale causa una riduzione di temperatura. Tale concetto è stato poi formalizzato dal fisico inglese W. Kelvin (1824-1907) nel 1853 e da J. Joule (1818-1889) nel 1857. Data la reciprocità degli effetti, una riduzione di dimensione causa un incremento di temperatura. Una sollecitazione periodica di un materiale causa pertanto un incremento di temperatura localizzato in corrispondenza di punti di concentrazione di sforzi. La vibrotermografia è una tecnica di indagine termica che si basa su tale principio. L'azione di una sollecitazione meccanica periodica generata attraverso vibrazioni a frequenza compresa tra 0 e 25 kHz, per effetto della conversione diretta tra energia meccanica ed termica, causa un rilascio di calore in corrispondenza di rotture e delaminazioni, rendendole visibili attraverso l'imaging termico.

Capitolo 5

I fondamenti teorici

5.1 Le grandezze termofisiche

5.1.1 Conduttività

La conduttività termica k é una propriet  termofisica della materia definita come:

$$k = \frac{q_n}{\partial T / \partial n} \quad [\text{W/mK}] \quad (5.1)$$

La conduttivit  esprime l'attitudine di un materiale a essere attraversato da un flusso di calore se sottoposto ad una differenza di temperatura T (Santoli, 1999). Coincide con il flusso di energia termica che attraversa nell'unit  di tempo (q_n), un certo materiale sotto l'azione di un gradiente termico unitario, e $\partial T / \partial n$ il gradiente termico in direzione ortogonale al flusso.

5.1.2 Diffusività

La diffusività termica α esprime la capacità di un mezzo di condurre calore in rapporto alla sua attitudine ad accumularlo:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (5.2)$$

I materiali ad alta diffusività termica rispondono più velocemente ai cambiamenti di equilibrio termico dei materiali a bassa diffusività, trovando più rapidamente un nuovo equilibrio termico. Risulta di particolare importanza nello studio dei fenomeni transitori.

5.1.3 Effusività

L'effusività e è una proprietà dei materiali che interessa i processi di scambio termico superficiali transitori, in particolare misura l'attitudine di un materiale di scambiare calore con gli elementi circostanti ed è definita da:

$$e = \sqrt{k\rho C} \quad [\text{Ws}^{1/2}/\text{m}^2\text{K}] \quad (5.3)$$

5.1.4 Densità e Calore Specifico

La densità ρ misura la quantità di massa per unità di volume.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad [\text{Kg}/\text{m}^3] \quad (5.4)$$

Il calore specifico C è la quantità di calore necessario per innalzare di un grado la temperatura di un quantità di materiale avente massa unitaria.

$$C = \frac{Q}{M\Delta T} \quad [\text{J}/\text{kgK}] \quad (5.5)$$

Entrambe le grandezza possono essere considerate grandezze termodinamiche in quanto intervengono nell'equilibrio termodinamico dei sistemi.

5.2 Le onde termiche

Si consideri un semispazio in cui viene rilasciato nella sua superficie limite un flusso di calore con andamento periodico sinusoidale di frequenza angolare ω . A distanza x dal piano, al tempo t il valore della temperatura T é espresso dall'equazione seguente:

$$T(x, t) = T_0 e^{-x/\mu} \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \omega t\right) \quad (5.6)$$

dove μ rappresenta la lunghezza di diffusione termica espressa da

$$\mu = \sqrt{\frac{2k}{\omega\rho C}} = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad (5.7)$$

in cui k rappresenta la conduttività termica, C il calore specifico, α la diffusività termica e λ la lunghezza d'onda termica, definita come

$$\lambda = 2\pi\mu \quad (5.8)$$

La velocità di propagazione v dell'onda é pari a

$$v = \lambda \frac{\omega}{2\pi} = \sqrt{2\omega\alpha} \quad (5.9)$$

La differenza di fase dell'onda termica ϕ al variare della distanza é pari a

$$\phi(x) = \frac{2\pi x}{\lambda} = \frac{z}{\mu} \quad (5.10)$$

5.2.1 Le onde diffusive

All'interno dei fenomeni ondulatori le onde termiche presentano un carattere di sostanziale differenza rispetto alle onde acustiche od ottiche, esse sono infatti classificate entro la classe delle onde diffusive, caratterizzata da una legge nella forma:

$$\nabla^2 \Psi(r, t) - \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial t} \Psi(r, t) + F(r) \Psi(r, t) = q(r) e^{i\omega t} \quad (5.11)$$

Nella quale la forzante pilota $q(r) e^{i\omega t}$ genera soluzioni oscillatorie nella forma $F(r, \omega) e^{i\omega t}$ per la funzione ondulatoria di campo $\Psi(r, t)$. Ponendo $\Psi(r, t) = T(r, t)$ temperatura, $D = \alpha$ diffusività termica ed $F(r) = 0$, ricaviamo

$$\nabla^2 T(r, t) - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial}{\partial t} T(r, t) = q(r) e^{i\omega t} \quad (5.12)$$

in cui è facile riconoscere l'equazione che governa la conduzione del calore nei solidi.

E' in corso in questi ultimi anni un'intensa attività di ricerca sia da un punto di vista sperimentale che fisico-matematico sulle modalità di propagazione delle onde diffusive in genere, e termiche in particolare, all'interno di due mezzi aventi diversa diffusività termica, con particolar riguardo alla possibilità di estendere alle onde termiche le leggi di riflessione e rifrazione proprie delle onde iperpolibliche, quali le ottiche, sismiche o elettromagnetiche. Nel 2001 Mandelis (Mandelis *et al.*, 2001) fa notare che non è formalmente corretto estendere alle onde diffusive i fenomeni di riflessione e rifrazione che governano le onde ottiche, elettromagnetiche o soniche. Tuttavia evidenzia che è possibile considerare la legge di riflessione e di Snell come un'adeguata approssimazione sotto condizioni di incidenza dell'onda che non superino i 30-40° di deviazione dalla normale, oltre i quali è necessario far ricorso

a leggi più complesse. Shendeleva (Shendeleva, 2001b; Shendeleva, 2001a; Shendeleva, 2003; Shendeleva, 2004) affronta il tema della rifrazione e della riflessione delle onde termiche nel caso bidimensionale per sorgenti impulsive e periodiche secondo un approccio che mira ad evidenziare la componente del campo di temperatura diretta, riflessa e rifratta evidenziando le analogie con il caso ottico definendo i raggi termici come il percorso corrispondente alla minima distanza termica d definita da

$$d = \int_A^B \frac{ds}{\sqrt{\alpha}} \quad (5.13)$$

e le superfici d'onda (wave surface) come le superfici ortogonali ai raggi. Fa inoltre notare che una curva compresa fra punti posti a uguale distanza termica dalla sorgente presa lungo i raggi che dipartono da essa, può essere chiamata superficie d'onda (wave surface) e che tali superfici risultano ortogonali ai raggi. Tale definizione di raggi e superfici d'onda non presenta dipendenza da tempo, a meno che non ci si trovi in presenza di sorgenti mobili o proprietà termiche variabili nel tempo. A differenza dei raggi ottici il flusso di energia non si verifica nella direzione dei raggi, in quanto, in accordo con la legge di Fourier, il flusso di calore Q è proporzionale al gradiente termico ΔT

$$Q = -k\Delta T \quad (5.14)$$

Pertanto per individuare la direzione di propagazione del calore è necessario tracciare le linee di gradiente termico (chiamate anche “streamline”) che per definizione, sono quelle curve tangenti punto per punto al gradiente termico, ovviamente ortogonali alle curve a uguale temperatura (isoterme).

5.2.2 Riflessione

Analogamente ad altri tipi di onde, le onde termiche subiscono una riflessione in corrispondenza di interfacce fra materiali con differente comportamento termico. In particolare il coefficiente di riflessione termico R può essere espresso in funzione delle effusività termiche e dei due materiali

$$R = \frac{e_2/e_1 - 1}{e_2/e_1 + 1} \quad (5.15)$$

5.2.3 Rifrazione

Così come esiste un'analogia con le onde meccaniche per quanto riguarda la riflessione anche le onde termiche manifestano il fenomeno della rifrazione. Consideriamo un mezzo stratificato e supponiamo che il punto O subisca un'oscillazione di temperatura sinusoidale. Sia α_1 la diffusività termica del mezzo superiore e α_2 la diffusività termica del mezzo inferiore. La velocità di propagazione di un'onda termica di frequenza angolare ω nei materiali sarà rispettivamente

$$v_1 = \sqrt{2\omega\alpha_1} \quad v_2 = \sqrt{2\omega\alpha_2} \quad (5.16)$$

5.2.4 Sorgente puntuale

Si consideri un mezzo in cui viene rilasciato nel punto O , origine del sistema di riferimento, un flusso di calore con andamento periodico sinusoidale di frequenza angolare ω a distanza r dall'origine, al tempo t il valore della temperatura T è espresso dall'equazione seguente:

$$T = \frac{1}{4\pi kr} e^{-kr+i(\omega t-kr)} \quad (5.17)$$

dove

$$k = 1/\mu = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \quad (5.18)$$

5.3 Studio teorico preliminare di fattibilità del metodo.

La possibilità di offrire, in analogia a metodiche di prospezione correntemente in uso nella geofisica, un apporto innovativo alle potenzialità offerte dalle tecniche di indagine termiche basate su termovisione a infrarossi rappresenta l'obiettivo del presente lavoro. Le tecniche di diagnostica termica sono principalmente tecniche per riflessione (energizzazione e rilievo sulla stessa superficie del provino) e con energizzazione artificiale (lampade flash, cinematografiche, getti di aria calda).

L'aspetto di innovazione che si vuole fornire è quello di operare per trasparenza, servendosi delle analogie che le onde termiche possiedono rispetto alle onde sismiche, e di operare per riflessione con energizzazione naturale. La necessità di affrontare uno studio di natura sperimentale richiede un lavoro propedeutico che, fondandosi sulle conoscenze acquisite, indirizzi l'esperimento verso una direzione che offra possibilità di riuscita ed escluda l'eventualità che gli esiti delle prove siano inefficaci anche solo alla luce di un'analisi di tipo teorico-matematico. L'aspetto cruciale della sperimentazione è senza dubbio quello di valutare la possibilità di rivelare strumentalmente le grandezze fisiche su cui operare l'analisi successiva e per questa ragione uno studio preliminare di fattibilità ha interessato la possibilità di operare su materiali scarsamente conduttivi alla trasmissione del calore misurando le variazioni che un'onda termica, generata in modo opportuno, presenta nell'avanzamento nel mezzo.

Si consideri un mezzo omogeneo isotropo, assimilabile ad un semispazio. Ipotizziamo che le proprietà del mezzo siano note e si supponga un oscillazione di temperatura della superficie limite del semispazio (forzante o sorgente termica) che modella analiticamente il materiale.

Supponiamo che l'oscillazione di temperatura superficiale sia:

$$T = T_0 + \sum_{n=1}^{\infty} T_n \cos(n\omega t - \phi_n) \quad (5.19)$$

Dove T_0 rappresenta la temperatura di offset dell'oscillazione periodica, T_n l'ampiezza dell'oscillazione di temperatura, n risulta l'ordine di armonica rispetto all'oscillazione, ω la velocità angolare, t il tempo e ϕ_n la fase iniziale della rispettiva armonica. Considerando unicamente l'oscillazione per $n = 1$, ovvero una oscillazione di temperatura monocromatica in assenza di armoniche allora, con ovvio significato dei simboli:

$$T = T_0 + T \cos(\omega t - \phi) \quad (5.20)$$

La soluzione di un problema di questo genere è stata affrontata da Carslaw e Jaeger, è nota la legge che regola la propagazione della perturbazione termica in funzione della distanza:

$$T = T_0 + T e^{-\kappa x} \cos(\omega t - \phi - \kappa x) \quad (5.21)$$

L'oscillazione superficiale di temperatura si comporta come fenomeno ondulatorio e si propaga nel mezzo con la stessa velocità angolare della forzante ω e quindi la stessa frequenza f della forzante termica, ipotizzando una sezione del semispazio ad una profondità x , questa presenterà :

1. frequenza ω analoga alla forzante termica;

2. sfasamento rispetto alla forzante termica κx ;
3. attenuazione proporzionale a $e^{-\kappa x}$.

Appare evidente che il fenomeno di propagazione dell'oscillazione termica della superficie (forzante termica) verso l'interno del semispazio costituisce sostanzialmente un'onda termica piana e la sua propagazione è legata alla variabile κ .

Quest'ultima è espressa da:

$$\kappa = (\omega/2\alpha)^{1/2} \quad (5.22)$$

e, a sua volta la diffusività termica α da:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C} \quad (5.23)$$

Il parametro diffusività termica α ed il periodo della forzante termica assumono pertanto un aspetto fondamentale sia riguardo le attenuazioni che l'onda termica subisce propagandosi, sia rispetto allo sfasamento rispetto alla forzante termica generatrice.

Per valutare la possibilità di servirsi del fenomeno in un contesto geofisico si è ipotizzato di studiare il comportamento in un modello costituito da polistirene estruso, di cui sono note le proprietà termiche:

Grandezza Fisica	Valore	Unità di misura
Resistenza termica	1,8000	$(m^2K)/W$
Spessore	0,0400	m
Resistività termica	45,0000	$(mK)/W$
Conduttività termica	0,0222	$W/(mK)$
Capacità termica	1400,0000	$J/(KgK)$
Densità	35,0000	$Kg/(m^3)$
Diffusività	0,00000045351	m^2/s
Periodo	7200,0000	s
Frequenza	0,00013888889	s^{-1}
Velocità angolare	0,00087266667	rad/s

Stante il contesto matematico è possibile valutare il valore di κ

$$\kappa = (\omega/2\alpha)^{1/2} = (0,00087266667/2 * 0,00000045351)^{0,5} = 1,0241m^{-1} \quad (5.24)$$

E' possibile allora valutare la tracciabilità del fenomeno legato alla propagazione su di un siffatto materiale della propagazione di un'onda termica supposta, per semplicità di analisi, piana in termini di attenuazione dell'intensità e di sfasamento rispetto alla sorgente. I risultati del calcolo sono riportati nella tabella seguente:

Distanza[m]	Attenuazione[1]	Sfasamento[deg]
0,00	1,000	0,00
0,01	0,990	1,66
0,02	0,980	3,33
0,03	0,970	4,99

0,04	0,960	6,66
0,05	0,950	8,32
0,06	0,940	9,99
0,07	0,931	11,65
0,08	0,921	13,31
0,09	0,912	14,98
0,10	0,903	16,64
0,11	0,893	18,31
0,12	0,884	19,97
0,13	0,875	21,64
0,14	0,866	23,30
0,15	0,858	24,96
0,16	0,849	26,63
0,17	0,840	28,29
0,18	0,832	29,96
0,19	0,823	31,62
0,20	0,815	33,29
0,21	0,806	34,95
0,22	0,798	36,61
0,23	0,790	38,28
0,24	0,782	39,94
0,25	0,774	41,61
0,26	0,766	43,27
0,27	0,758	44,94
0,28	0,751	46,60
0,29	0,743	48,26
0,30	0,735	49,93

0,31	0,728	51,59
0,32	0,721	53,26
0,33	0,713	54,92
0,34	0,706	56,59
0,35	0,699	58,25
0,36	0,692	59,91
0,37	0,685	61,58
0,38	0,678	63,24
0,39	0,671	64,91
0,40	0,664	66,57

L'attenuazione rappresenta il rapporto tra l'ampiezza della forzante termica e l'oscillazione armonica di temperatura alla distanza corrispondente, mentre la fase rappresenta in gradi sessagesimali il loro reciproco sfasamento. E' necessario tenere in considerazione che quando si usa il termine attenuazione non si sta considerando l'attenuazione del flusso di calore che attraversa il materiale (attenuazione che è enormemente maggiore), ma della riduzione di oscillazione di temperatura a tale distanza dalla forzante termica (sorgente).

Le formule utilizzate per valutare i dati in tabella sono:

- *sfasamento* = κx ;
- *attenuazione* = $e^{-\kappa x}$

Il periodo della forzante termica è stato scelto in relazione alla scarsa diffusività termica del materiale.

Pertanto l'attenuazione subita da un'onda termica per percorrere tale strato supponendo un periodo della forzante di 2h risulterebbe sufficiente intenso da essere rilevato con tecniche di termovisione e quindi utilizzato:

- Per la valutazione, anche in sito della diffusività termica del materiale;
- Nota la diffusività per stimare capacità termica e densità
- Procedendo con analisi tomografiche bidimensionali e/o tridimensionali all'individuazioni di inclusioni che presentino anomalie di diffusività termica.

E' positiva la fattibilità tecnica a livello teorico dell'analisi operando un'energizzazione con forzante termica su un lato di un pannello di polistirene estruso e una rilevazione sul lato opposto con tecniche di termovisione. Appare tuttavia verosimile la possibilità di operare sul medesimo lato accessibile del materiale investigato ad esempio rispetto al suolo di un terreno, alla ricerca questa volta di anomalie che *riflettono* l'onda piana incontra nel propagarsi nel mezzo ed il riconoscimento della profondità, nota la diffusività media del materiale, mediante la misura del ritardo di fase dell'onda termica riflessa, come effettivamente operato nella tecnica termografica "LockIn".

Estrapolando e deducendo da quanto esposto è possibile trarre alcune considerazioni generali. Sia T_{ril} l'ampiezza di oscillazione termica ad una distanza x dalla forzante, e sia T_{forz} l'ampiezza della forzante termica, il loro rapporto è espresso dalla formula:

$$\frac{T_{ril}}{T_{forz}} = 2 * e^{(\omega/2\alpha)^{1/2}x} \quad (5.25)$$

Poichè la capacità della termocamera di discriminare rispetto al rumore di fondo T_{ril} è un parametro vincolato, e così pure la T_{forz} è possibile stimare la massima distanza x di rivelabilità con l'espressione:

$$x = \ln(T_{ril}/T_{forz}) \frac{2\alpha}{\omega} \quad (5.26)$$

In un'analisi con energizzazione naturale (insolazione diurna - raffreddamento notturno) anche il valore di ω è vincolato e la profondità di indagine nello studio per esempio di un terreno con termovisione del terreno sovrastante è vincolata alla diffusività α del materiale, tenendo in conto che il percorso dell'onda è doppio dovendo ripercorrere a ritroso il percorso effettuato per raggiungere un materiale che generi la riflessione.

Capitolo 6

Analogia geoelettrica-termica

6.1 Generalità

Come già descritto dalla 5.1 che definisce la conduttività termica come l'attitudine di un materiale ad essere attraversato da un flusso di calore (Legge di Fourier), si ha :

$$\frac{Q}{dA} = -k \frac{T}{n} \quad (6.1)$$

con:

- k conducibilità termica [$Wm^{-1}K^{-1}$]
- Q flusso termico [W]
- A area attraversata dal flusso termico [m^2]
- T temperatura [K]
- n coordinata spaziale nel verso di propagazione del flusso [m]

In condizioni stazionarie di flusso termico unidimensionale attraverso un elemento omogeneo, facendo riferimento alle differenze finite, la relazione precedente si può scrivere come:

$$Q = -kA \frac{T_2 - T_1}{s} \quad (6.2)$$

con:

- k conducibilità termica [$Wm^{-1}K^{-1}$]
- Q flusso termico [W]
- A area attraversata dal flusso termico [m^2]
- T_1 temperatura superficie “calda” [K]
- T_2 temperatura superficie “fredda” [K]
- s spessore dell’elemento [m]

Dal momento che il mezzo attraversato dal flusso di calore (ad esempio le pareti di una muratura) si può generalmente descrivere come una successione di più strati, mettendo in evidenza la differenza di temperatura ΔT_i tra due strati contigui la relazione precedente si può scrivere come:

$$\Delta T_i = \frac{Q s_i}{A k_i} \quad (6.3)$$

dove s_i e k_i sono rispettivamente spessore e conducibilità termica dell’ i -esimo strato.

Considerando il caso di una parete piana composta da più strati di materiali contigui, l’andamento della temperatura a regime si può considerare lineare in ogni strato, essendo, per continuità, la stessa su ogni superficie comune. In questo caso il flusso termico sarà dato da:

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2}} \quad (6.4)$$

Analizzando questo comportamento non è difficile stabilire un'analogia con l'elettrica. Se si pone, infatti:

$$Q = I \quad (6.5)$$

$$T_1 - T_2 = \Delta V \quad (6.6)$$

essendo $1/\frac{k_i}{s_i} = R_i$ cioè l'analogo di una resistenza, si può pensare che gli strati costituenti lo strato interessato dal flusso di calore siano posti in serie, proprio come resistenze in serie, e quindi:

$$Q = \frac{\Delta T}{\sum_i \frac{s_i}{\lambda_i}} \longrightarrow I = \frac{\Delta V}{\sum_i R_i} \quad (6.7)$$

con equivalenza formale tra la legge di Fourier e la legge di Ohm (Gupta & Tuli, 2005).

6.2 Condizioni di applicazione

Perché possa praticamente essere realizzata una tomografia termica partendo dai presupposti dell'analogia con la geoelettrica, occorre che si realizzi un flusso di calore noto e costante nel tempo e che la misura della temperatura avvenga in condizioni di equilibrio termico. Tale genere di approccio presenta perciò dei limiti di natura tecnica. Infatti la somministrazione di un flusso di calore noto e predeterminato risulta difficoltoso utilizzando strumenti di misura semplici e poco onerosi e inoltre è difficile che la misura possa avve-

nire in condizioni di equilibrio termico. Per tali ragioni è in pratica difficile realizzare un'esatta equivalenza elettrica-termica. Può invece essere seguita la stessa impostazione metodologica ricorrendo ad un'energizzazione di tipo passivo, quindi non controllata, in modo tale da poter sfruttare fenomeni che si verificano naturalmente con regolarità, quale ad esempio l'alternanza di riscaldamento e raffreddamento dovuta all'insolazione diurna contrapposta all'assenza di irraggiamento della notte; o ad una energizzazione attiva eseguita in particolari condizioni e in particolari ambienti. In entrambi i casi la misura della temperatura può essere effettuata con l'uso di una termocamera, operando una sequenza di acquisizioni a intervalli regolari sulla superficie del corpo investigato, in modo tale da monitorare l'evoluzione della temperatura nel tempo. Per quanto riguarda i processi successivi: modellazione, trattamento dei dati e inversione si possono utilizzare gli algoritmi utilizzati nella tomografia elettrica, ovviamente adattati al caso termico. Tramite il metodo degli elementi finiti, è possibile simulare analiticamente la risposta termica del corpo, analizzare la temperatura superficiale e, tramite un confronto con i valori misurati, operare una correzione sui parametri del modello, fino a raggiungere una buona corrispondenza con le temperature misurate e i risultati del calcolo numerico.

6.3 La strumentazione

Come detto per avere una misura della temperatura in condizione (Kashimura, 2000a; Kashimura, 2000b) di quasi equilibrio sono state eseguite misure con termocamera. Nell'arco dell'intera ricerca sono state utilizzate due termocamere: AVIO TVS 2000ST e quella di ultima generazione, Flir Systems ThermaCAM P25.

6.4 Applicazioni

Per testare il metodo proposto sono stati scelti due casi di interesse, uno di tipo ingegneristico-architettonico e uno di tipo archeologico. I due casi sono in realtà modelli fisici riprodotti in scala reale, studiati anche con diversi metodi geofisici sperimentali.

6.4.1 Modello A

Il primo modello è costituito da una muratura comune esistente nel laboratorio di Fisica tecnica del Dipartimento di Ingegneria del Territorio e realizzata in blocco cementizio. In essa sono stati inseriti alcuni elementi di natura e forma diversa ma anche con presumibili caratteristiche termiche diverse. La muratura è un divisorio tra due ambienti accessibili (condizione non sempre verificata nel campo dei beni culturali e delle costruzioni antiche di cui poco si conosce). Con semplici accorgimenti è stato realizzato un flusso di calore controllato e quasi costante. In questo caso, l'interesse è stato ovviamente legato più al riconoscimento degli elementi immessi piuttosto che al riconoscimento delle condizioni di degrado e consistenza della muratura. Altri metodi microgeofisici applicati sullo stesso hanno mostrato pregi e difetti nel riconoscere questi oggetti (Deiana, 2004). Hanno inoltre mostrato difficoltà di applicazione e difficoltà di misura. Certamente il metodo termico sotto questo aspetto è risultato più immediato e meno distruttivo, non avendo bisogno di contatto con le pareti. Esso è perciò di assoluto interesse nel campo dei beni culturali, per quelle murature decorate o con affreschi di valore. Nel caso in esame, si sono verificate le condizioni di tomografia per trasparenza: da una parte la generazione di calore e il controllo del flusso, dall'altra parte della parete la misura indiretta della temperatura mediante un termocamera

(figura 6.1). Tale metodo ha rispetto al metodo tradizionale della termografia il vantaggio di penetrare maggiormente. La termografia tradizionale infatti opera dallo stesso lato e può determinare le distribuzioni spaziali e le variazioni temporali della temperatura. Da essa possono trarsi informazioni sulla natura degli elementi presenti in un corpo solo a profondità molto limitata. In generale variazioni locali delle proprietà termofisiche di un materiale sono considerate difetti nello stesso. In seguito a variazione della temperatura di un corpo che presenti dei difetti è pertanto possibile mettere in evidenza queste alterazioni e definire pertanto la struttura di un corpo ed eventualmente il suo stato di alterazione o di degrado (Almond & Lau, 1994; Saintey & Almond, 1995) ma solo nella parte superficiale. Resta tuttavia il limite della profondità di indagine, limitata in casi ottimali, a qualche centimetro. Restano precluse le possibilità di avere informazioni su strati più profondi. Con la sperimentazione effettuata sulle tecniche di tomografia termica applicate alle strutture murarie si è prefisso, pertanto, di superare questo limite, attraverso la realizzazione di un sistema che consenta, laddove le condizioni logistiche lo consentono, una lettura completa della tessitura muraria. Nel caso specifico, sul modello è stata utilizzata una griglia di misura costituita da 96 nodi risultanti dall'intersezione delle maglie di 10 cm di lato su un'area di 110 x 70 cm, secondo lo schema già riportato in Figura All'interno di una parete, in assenza di intercapedini, si ha essenzialmente un fenomeno di conduzione (Pitts & Sissom, 1982; Colombo, 1985; Cengel, 1998).

In Fig. 6.3 è riportato il termogramma relativo all'acquisizione effettuata dopo 3 ore di riscaldamento, nel quale si possono apprezzare chiaramente :la presenza del blocco di ferro, la spugna umida e l'orditura muraria.

In base ai dati raccolti è stato quindi possibile costruire un primo modello per l'analisi tridimensionale ed impostare quindi il problema per uno

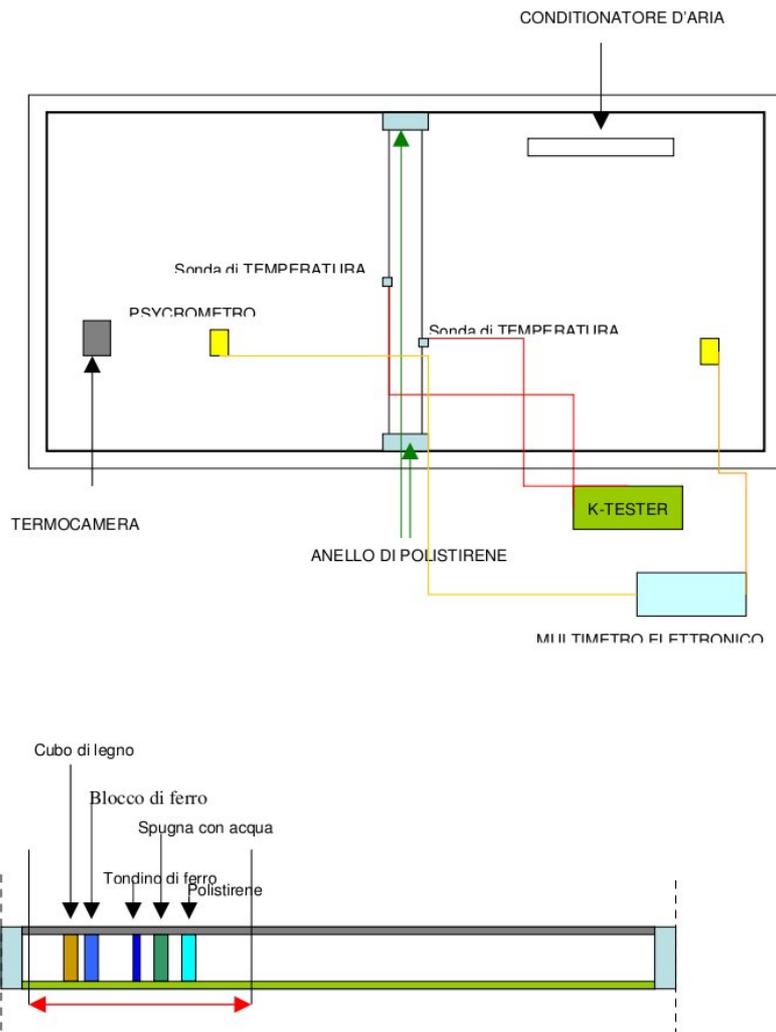


Figura 6.1: Sezione verticale e sezione orizzontale del modello A

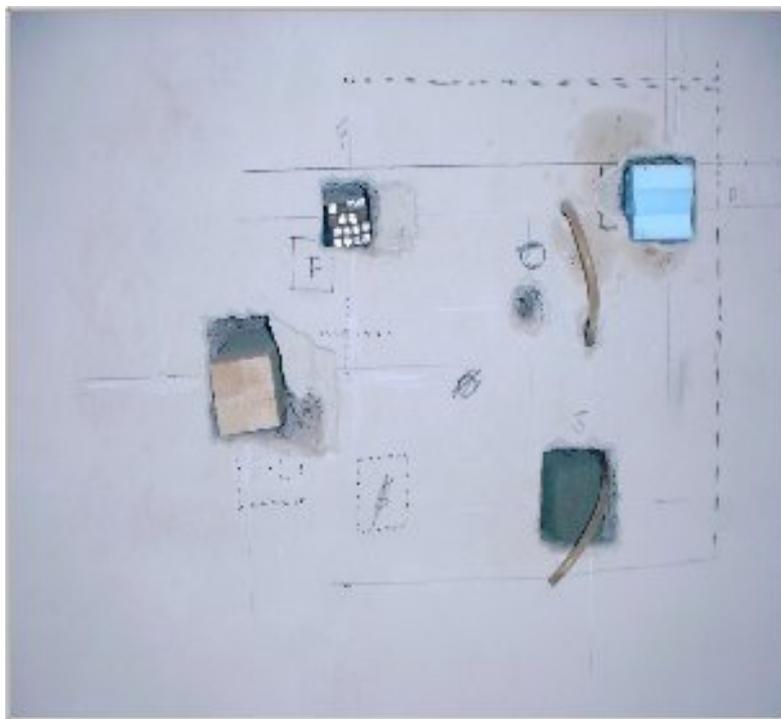


Figura 6.2: Posa in opera degli elementi all'interno della muratura. Vista dalla stanza "calda"

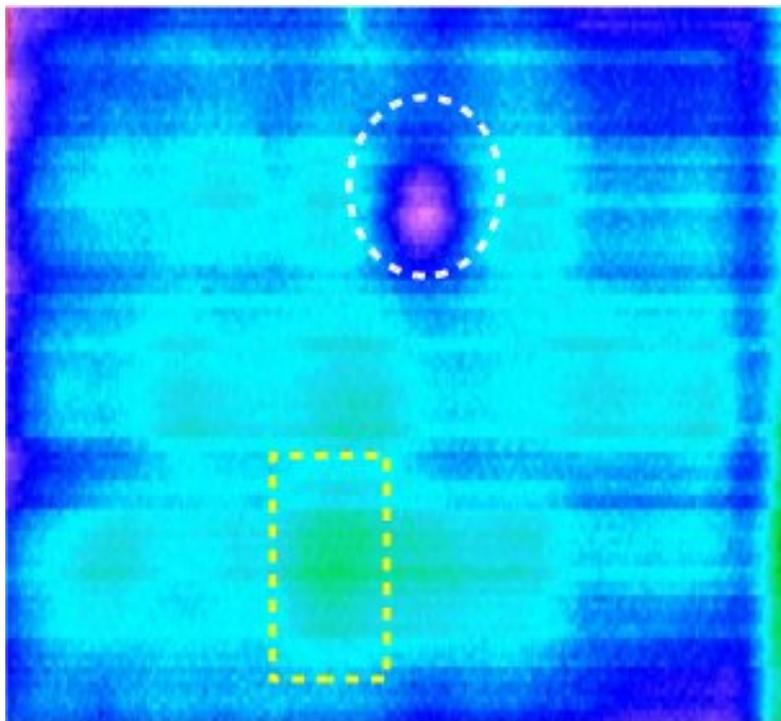


Figura 6.3: Termogramma a $t=3$ ore

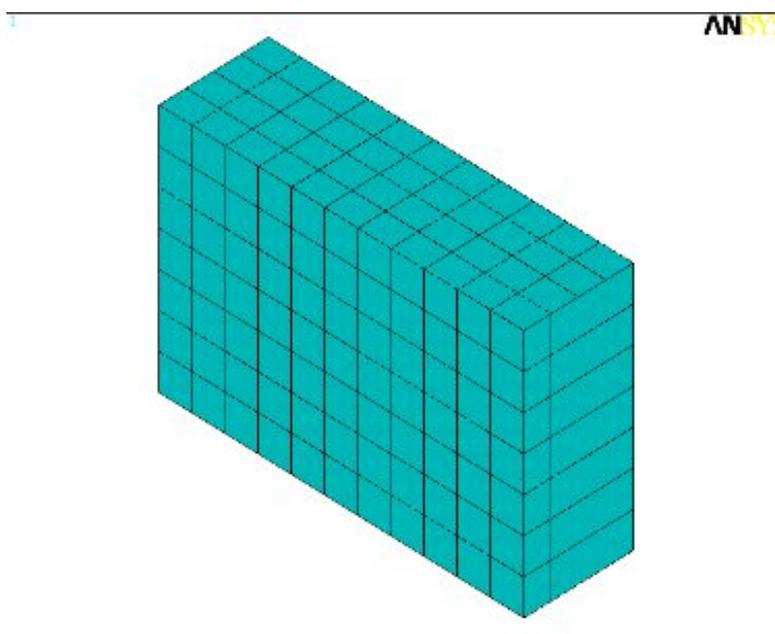


Figura 6.4: Mapped Mesh dell'area di misura (11cmx7cmx4cm)

studio tomografico (Cernuschi *et al.*, 1998; Boras & Svaic, 2002; Brink *et al.*, 2002). La griglia utilizzata per le misure termografiche di 110 x 70 cm è stata suddivisa in celle tridimensionali (11 x 7) a forma di parallelepipedo, il cui spessore, coincidente con quello del muro (16cm), è stato discretizzato attraverso 4 piani paralleli (Fig. 6.4).

Attraverso un software di analisi agli elementi finiti (Ansys) è stato quindi elaborato un modello capace di simulare analiticamente il comportamento del mezzo sottoposto all'azione di carichi termici. Nel programma sono stati utilizzati elementi SOLID70 capaci di simulare la conduzione termica tridimensionale ed in grado di assumere una configurazione ad 8 nodi (parallelepipedo), 6 nodi (prisma a base triangolare) o 4 nodi (tetraedro), a seconda delle specifiche esigenze. La mesh è stata studiata in modo tale che i nodi del modello fossero coincidenti con quelli del reticolo sui quali si è misurata, con i termogrammi, la variazione di temperatura al trascorrere del tempo.

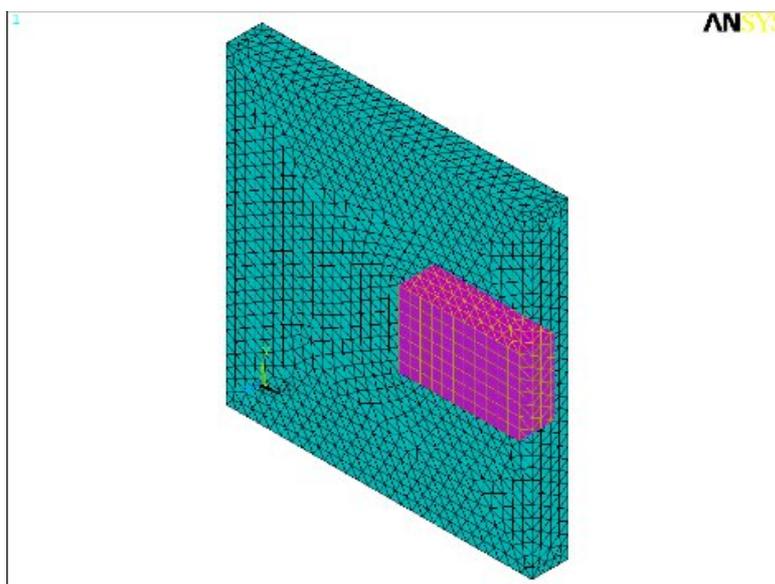


Figura 6.5: Discretizzazione del modello: area di interesse = viola (Mapped Mesh) - Area contorno = celeste (Free Mesh)

Per distinguere, inoltre, la zona su cui sono state effettuate le misure rispetto al resto del modello, sono stati utilizzati elementi brick a forma di parallelepipedo (mapped mesh) nell'area di interesse, mentre la restante parte è stata discretizzata con elementi tetraedrici a mesh non strutturata (free mesh) (Fig.6.5). Grazie a test preliminari, con i quali si sono misurati: la temperatura dell'aria, la temperatura sulle superfici nelle due camere e la quantità di calore che attraversava la sezione, è stato possibile ricavare la conduttanza termica media e la capacità termica media della parete. Dal rapporto tra il flusso di calore per unità d'area e la differenza di temperatura tra aria e superficie del muro è stato possibile così ricavare il coefficiente di convezione (Cengel, 1998). La capacità termica media è stata ricavata facendo alcune considerazioni di tipo numerico, partendo da un modello bidimensionale agli elementi finiti che considerasse la sola griglia 11 x 4 (spessore del muro), Fig. 6.5. Si è presa quindi in considerazione questa sezione e le temperature

dell'aria, nelle due camere, misurate dalle sonde psicrometriche ed il coefficiente di convezione e si è simulato così il comportamento della parete nel tempo, sotto l'azione di questi carichi termici, con particolare riferimento alla temperatura sulle superfici del muro. Assegnando diversi valori alle capacità termiche degli elementi del modello bidimensionale si è ricavato, per successive approssimazioni. Esaminando la sezione è possibile, quel valore che consentisse di ottenere le temperature effettivamente misurate sulle superfici del muro nelle due camere, al trascorrere del tempo. Questo valore è stato assunto come valore medio per la caratterizzazione del modello tridimensionale. Con i risultati delle prove preliminari sul muro è stato possibile quindi mettere appunto il modello tridimensionale che simulasse il comportamento termico medio della parete durante la prova con la termocamera. I carichi termici, intesi come temperatura dell'aria a contatto con la parete sono stati ricavati dalle registrazioni effettuate ogni minuto dalle sonde sistemate sulle rispettive superfici durante la prova, mentre la massa volumica media è stata desunta dalle specifiche tecniche dei materiali utilizzati per la costruzione del muro. La risoluzione del modello consente l'analisi del transitorio, descrivendo l'evoluzione delle temperature ai nodi della mesh in funzione del tempo. L'obiettivo dell'analisi FEM (Finite Element Model) è quello di valutare l'influenza che ciascuna delle celle del modello, caratterizzata da precise proprietà termofisiche, esercita sulla determinazione della temperatura nei differenti punti di misura.

Particolare attenzione è stata posta nella definizione di un coefficiente di influenza in grado di descrivere il peso che la capacità termica di ogni cella possiede nella determinazione della temperatura, in un preciso istante, di un qualsiasi punto sulla superficie muraria esterna.

Ripetendo per ogni cella questo procedimento e mettendo a sistema le

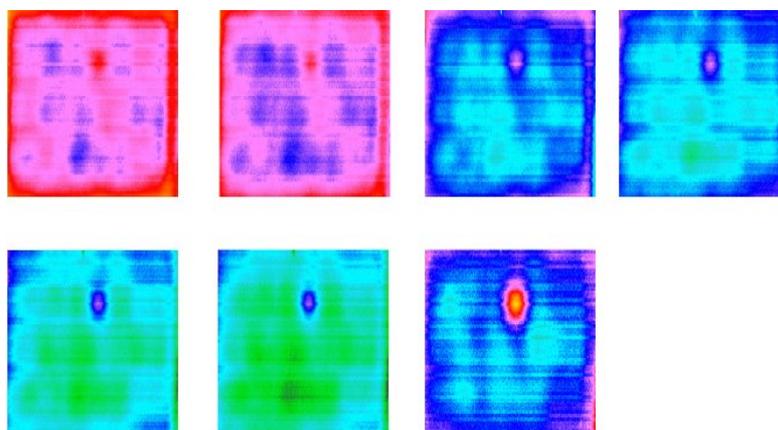


Figura 6.6: Sequenza dei termogrammi in 6 ore di registrazione. Range di temperatura: 15-20°C. Emissività 0,93.

temperature nei nodi, ricavate dalla simulazione FEM e i dati di variazione della capacità termica su ogni cella è stato possibile costruire tabelle che riportano il peso che una variazione di temperatura in un punto sulla superficie di misura esercita sulla capacità termica di ogni cella. Le registrazioni delle temperature dell'aria durante la prova e la stima del coefficiente di convezione hanno consentito di simulare un comportamento del modello molto vicino al caso reale riscontrato. Grazie a questo sistema, che rappresenta un primo passo verso la realizzazione di un algoritmo per tomografie termiche per trasparenza, è stato possibile descrivere la distribuzione tridimensionale della capacità termica nel volume relativo al modello indagato, avendo a disposizione i soli valori di temperatura acquisiti su una superficie con le misure termografiche (Piga *et al.*, 2006). Esaminando la sezione è possibile individuare corpi aventi capacità termiche differenti, molto vicine a quelle reali delle anomalie inserite nel modello (Santoli, 1999).

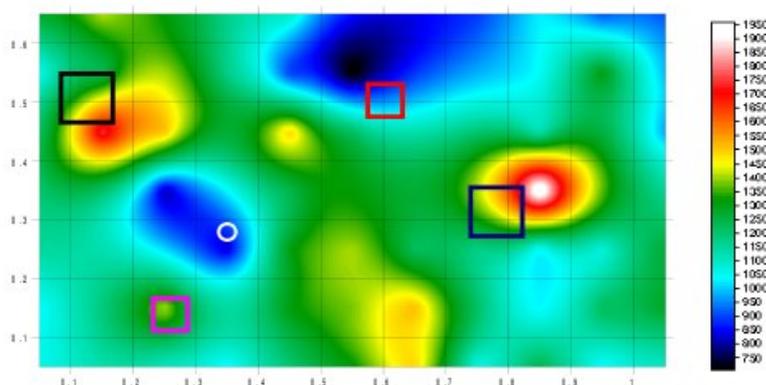


Figura 6.7: Sezione del modello tridimensionale con i risultati della simulazione FEM.

6.4.2 Modello B

Il secondo caso di applicazione nasce da un interesse oggi importante: rivelare la presenza di manufatti nel sottosuolo può essere di notevole importanza nella pianificazione della realizzazione di un'infrastruttura, di una struttura o di una campagna di scavi archeologici, per il beneficio di evitare problematiche in fase di esecuzione dei lavori o per ottimizzare le risorse economiche di un'eventuale ricerca archeologica. Metodi di indagine geofisica quale il georadar, la tomografia elettrica, il metodo magnetico si sono rivelati efficaci strumenti per questi scopi pur presentando tuttavia lo svantaggio di un intenso lavoro di prospezione che richiede investimenti significativi in termini di tempo, mano d'opera e strumentazione. La messa a punto di una metodica di un'indagine termica che si serva di una termocamera a infrarossi, presenterebbe il vantaggio di operare su aree vaste con un limitato ricorso alla mano d'opera, concentrando invece gli sforzi sugli aspetti legati all'elaborazione dei dati. Il metodo non è stato finora utilizzato in campo archeologico se non con riprese sporadiche, non ripetute nel tempo dall'aereo o addirittura da satellite e quindi con una risoluzione molto bassa. Nel nostro caso l'applica-

bilità di metodi di indagine termica allo specifico problema è stata valutata tramite la realizzazione di un modello costituito da un manufatto di mattoni di terra cruda (ladiri) interrato, con l'obiettivo di mettere a punto una metodologia operativa che consentisse di rivelare la geometria e la profondità del manufatto basandosi unicamente su misure termografiche. I "ladiri" sono mattoni in terra cruda ampiamente utilizzati nell'architettura tradizionale della Sardegna. Sono realizzati da un impasto di paglia e terreno argilloso (dal latino *later*, argilla), tramite uno stampo in legno o metallico e lasciati essicare naturalmente al sole. Nel sito archeologico di Nora sono visibili murature realizzate con questa tecnica costruttiva, probabilmente importata in Sardegna dai Punici. Essendo attualmente utilizzati nell'architettura tradizionale sono disponibili sul mercato dei materiali da costruzione e sono pertanto un materiale adatto alla sperimentazione.



Figura 6.8: I ladiri utilizzati per simulare una struttura archeologica

Il modello è stato realizzato in collaborazione con l'Ente Scuola Edile Cagliari ed è costituito da una struttura di forma rettangolare alta 1 m, realizzata con mattoni forati di calcestruzzo aventi una larghezza di 25 cm, che delimita un volume di lunghezza pari a 5 m e larghezza 4 m.



Figura 6.9: I blocchi utilizzati nella struttura di contenimento

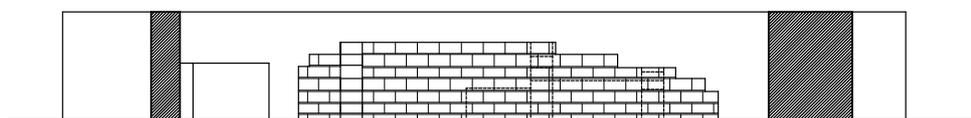


Figura 6.10: Vista sezionata del test site

All'interno di tale struttura, alla quota del p.d.c. é presente un elemento murario realizzato con ladiri che si sviluppa prevalentemente lungo la diagonale della struttura rettangolare di contenimento. La struttura in ladiri simula una presenza archeologica e presenta quindi altezze differenti e forme variamente articolate. Il volume contenente il muro in ladiri é stato quindi colmato con materiale terroso di granulometria analoga a quella utilizzata per la realizzazione dei conci in terra cruda utilizzati per la realizzazione del muro. Al momento delle misure il sito di prova si presentava quindi come una vasca colmata con materiale terroso.

6.5 La misura

Il volume interessato dall'indagine risulta compreso entro la struttura di contenimento. La distribuzione di temperatura della superficie limite superiore

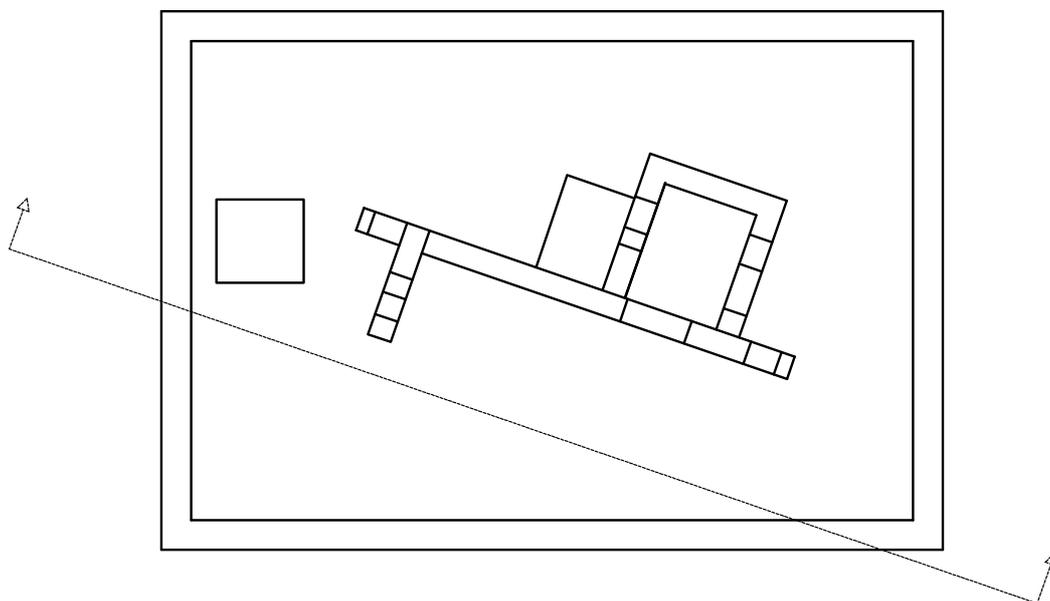


Figura 6.11: Planimetria del test site

risulta influenzata dagli scambi termici fra le regioni interne del volume e l'ambiente circostante, e sarà quindi in qualche maniera influenzata dalla presenza della struttura in ladiri interrata. Per valutare la possibilità di individuare tale struttura con metodi termici è quindi necessario rilevare l'evoluzione temporale della temperatura nei confronti della sua distribuzione spaziale. La termocamera P25 disposta su un ponteggio, realizzato su due livelli di 3 m ciascuno in due lati ortogonali del modello, inquadra un'area utile pari a circa un dodicesimo dell'intera superficie del modello. Il numero di fotogrammi necessari per ottenere lo stato termico della superficie superiore è perciò pari 12. Realizzando gli scatti a breve distanza l'uno dall'altro l'errore dovuto alla non contemporaneità degli stessi è inferiore all'errore strumentale. E' presente tuttavia una deformazione prospettica che necessita di una opportuna correzione. La sequenza di acquisizione, ripetuta a intervalli regolari, fornisce punto per punto l'evoluzione temporale della temperatura per effetto dei carichi termici esterni quale lo scambio di calore per convezione

con l'ambiente circostante.

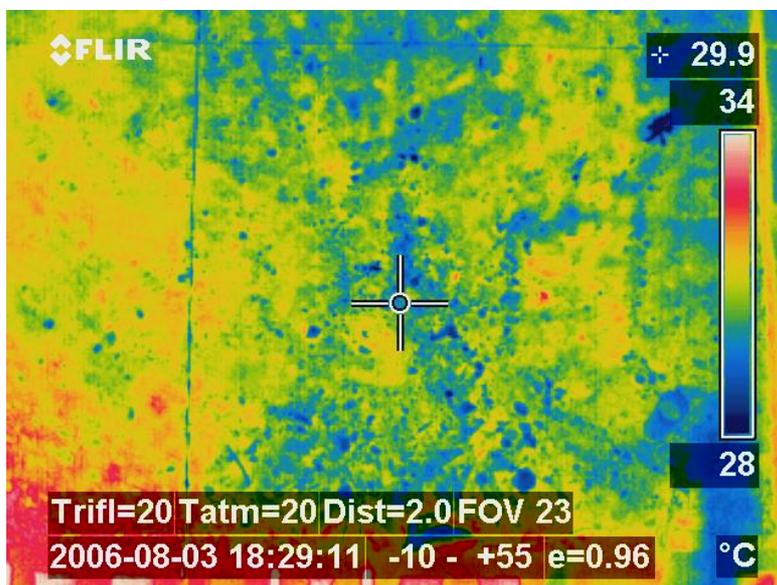


Figura 6.12: Fotogramma grezzo acquisito sul test site

Ciascuno scatto termografico inquadra una porzione limitata del sito. La ricostruzione di un'immagine che comprenda la superficie di interesse nella sua interezza rende necessario inserire nel campo visivo degli elementi di riferimento che consentano il successivo *montaggio* dei singoli scatti. Poiché le immagini contengono unicamente l'informazione termica, una marcatura della superficie secondo i metodi utilizzati per esempio nella fotogrammetria (piccoli segnali colorati che riproducono settori retti di circonferenza di colore alternato rosso e bianco) non risulterebbe efficace in quanto la temperatura risulterebbe uniforme e conseguentemente il contrasto termico nullo. Affinché il sistema di marcatura risulti efficace è necessario utilizzare un materiale che presenti un contrasto termico significativo. La superficie è stata quindi riquadrata con filo di ferro, del tipo comunemente utilizzato nella carpenteria metallica per cemento armato, che presentando una bassa inerzia termica variava la propria temperatura più velocemente della superficie del sito, ri-

sultando quindi ben visibile nel termogramma. La figura 6.12 mostra un fotogramma in cui risulta ben visibile il filo di ferro che realizza la quadratura. La ricostruzione dei carichi termici richiede la conoscenza dei parametri significativi per la successiva fase di modellazione. E' stata pertanto misurata ad intervalli regolari la temperatura e l'umidità dell'aria. Come noto la termocamera ricava la misura della temperatura a partire da una misura di radianza infrarosso servendosi della formula di misurazione che richiede la conoscenza dei seguenti parametri:

- l'emittanza dell'oggetto ε ;
- l'umidità relativa U_{rel} ;
- la temperatura ambiente dell'aria T_{atm} ;
- la distanza dell'oggetto D_{obj} ;
- la temperatura dell'area circostante l'oggetto o la temperatura ambientale riflessa T_{refl} .

Come già detto, la temperatura e l'umidità dell'aria è stata registrata durante la prova, la temperatura ambientale riflessa è stata misurata secondo le modalità indicate dal produttore, l'emittanza dell'oggetto è stata valutata anch'essa secondo le modalità espresse dal produttore. In particolare è stata applicata sul terreno una porzione di nastro adesivo di emissività nota, si è annotata la temperatura misurata dalla termocamera sul nastro impostando sulla stessa il valore di emissività opportuno, quindi si è variata l'emissività impostata fino a misurare su una porzione di suolo adiacente al nastro il valore di temperatura precedentemente misurato sul nastro stesso. La distanza termocamera oggetto è stata valutata con semplici formule matematiche. Le operazioni di impostazioni dei valori opportuni sulla termocamera richiedeva

tempo. Le elaborazioni successive ipotizzano la contemporaneità della misura dei differenti fotogrammi, pertanto si è preferito privilegiare la velocità fra uno scatto e il successivo, impostando i valori opportuni di emissività, distanza dall'oggetto etc, in una fase successiva attraverso il software in dotazione alla termocamera.

6.6 L'elaborazione dei dati

I dati registrati durante la fase di misurazione sono stati sottoposti ad una serie di operazioni:

1. correzione dei parametri della formula di misurazione;
2. correzione della radianza causata dall'inclinazione della termocamera;
3. georeferenziazione;
4. modellazione;
5. inversione.

6.6.1 Formula di misurazione

La formula di misurazione, utilizzata dalla strumentazione e dal software termografico è la seguente:

$$\begin{aligned}
 U_{oggetto} = & \frac{1}{\tau\varepsilon} U_{totale} \\
 & - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} U_{riflessa} \\
 & - \frac{1-\tau}{\tau\varepsilon} U_{atmosfera}
 \end{aligned} \tag{6.8}$$

Al fine di calcolare la temperatura della superficie osservata $T_{sorgente}$ è necessaria la conoscenza dei parametri ε , $u_{relativa}$, $T_{atmosferica}$, d , T_{refl} come descritto al paragrafo 2.5. Per minimizzare l'errore dovuto alla non contemporaneità degli scatti durante la realizzazione delle misure si è preferito non impostare i parametri necessari ad una precisa determinazione del valore della temperatura. I file dei termogrammi registrati dalla termocamera contengono infatti al loro interno i valori radiometrici della misura ed è stato possibile pertanto applicare i parametri corretti durante la successiva fase di elaborazione. La formula di misurazione suppone l'ortogonalità della superficie da cui proviene l'emissione rispetto all'asse ottico della termocamera. Le condizioni operative in cui si è operato non consentivano il rispetto di tale condizione si è proceduto pertanto ad una correzione dei valori misurati in relazione alla deviazione dell'asse ottico rispetto alla normale della superficie inquadrata calcolata con semplici formule di geometria.

6.6.2 Georeferenziazione

Le immagini termografiche, ciascuna delle quali presentava una vista parziale del campo di temperatura sulla superficie di interesse, presentano una evidente distorsione prospettica che rende problematica l'assegnazione di una coordinata al punto cui la misura di temperature si riferisce, oltre che un montaggio delle viste parziali in un'unica immagine dell'intera superficie (Bertani *et al.*, 1983; Boninu *et al.*, 1997). La correzione della distorsione prospettica è stata realizzata servendosi del software di processing matematico Matlab, ed in particolare dell'Image Processing Toolbox. E' stata elaborata una rudimentale interfaccia grafica che consentiva di scegliere quattro punti di controllo per ciascuna immagine e operare una correzione spaziale delle stesse. E' stato fissato un sistema di riferimento sulla superficie di interesse

avente origine sullo spigolo inferiore sinistro e assi orientati ortogonalmente. I punti di controllo sono stati scelti ai vertici del reticolo di riferimento.

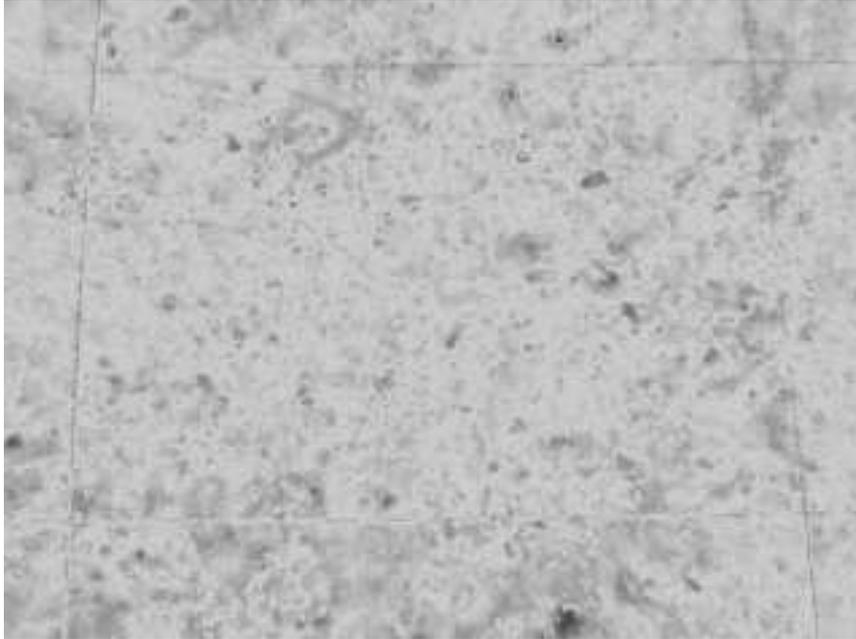


Figura 6.13: Termogramma grezzo prima della georeferenziazione

6.6.3 Modellazione

La modellazione é quella parte del processo che consente di prevedere analiticamente un fenomeno fisico servendosi di un modello matematico vincolato al rispetto di leggi fisiche, espresse in forma di equazioni, e caratterizzato da un certo numero di parametri che sintetizzano la natura dell'elemento reale di cui si vuole studiare il comportamento. Nel caso specifico tale elemento é costituito dal site test e il comportamento di interesse che si vuole analizzare é l'evoluzione della sua temperatura nel tempo sotto l'azione degli effettivi carichi termici applicati. Le leggi fisiche che devono essere rispettate sono quelle che descrivono la trasmissione del calore per conduzione e convezione.

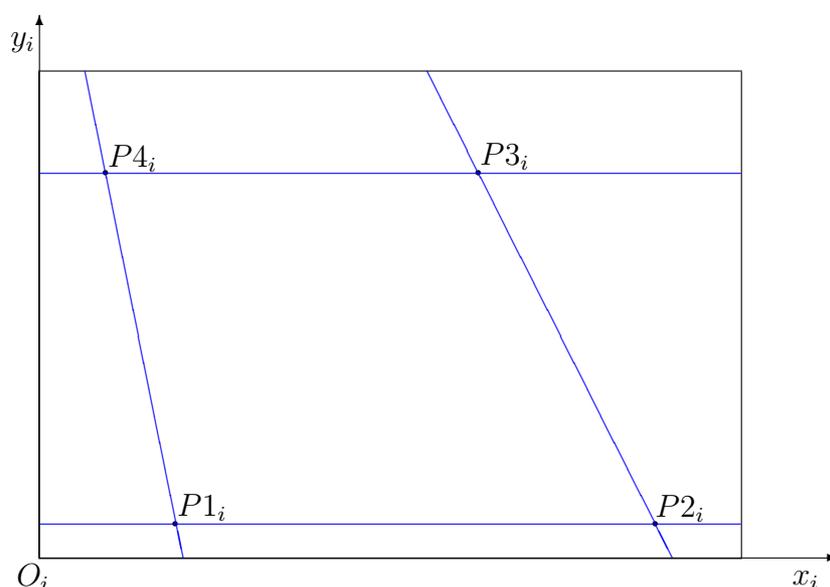


Figura 6.14: Sistema di riferimento del termogramma grezzo

I carichi termici sono legati alla trasmissione di calore per convezione dall'aria alla superficie del manufatto. Naturalmente il modello deve tenere conto delle anomalie presenti al di sotto della superficie. L'analisi è stata condotta con il metodo degli elementi finiti applicato alla soluzione delle equazioni alle derivate parziali che descrivono analiticamente il fenomeno di scambio termico. Il modello di prova è stato semplificato nella trattazione matematica con un volume di forma parallelepipedica discretizzato in elementi di analoga forma ma di dimensioni ridotte, ciascuno dei quali è caratterizzato da una serie di parametri:

1. densità;
2. conduttività termica;
3. calore specifico.

La teoria che descrive la conduzione del calore chiarisce che il parametro di interesse per lo studio del fenomeno è essenzialmente la diffusività termica

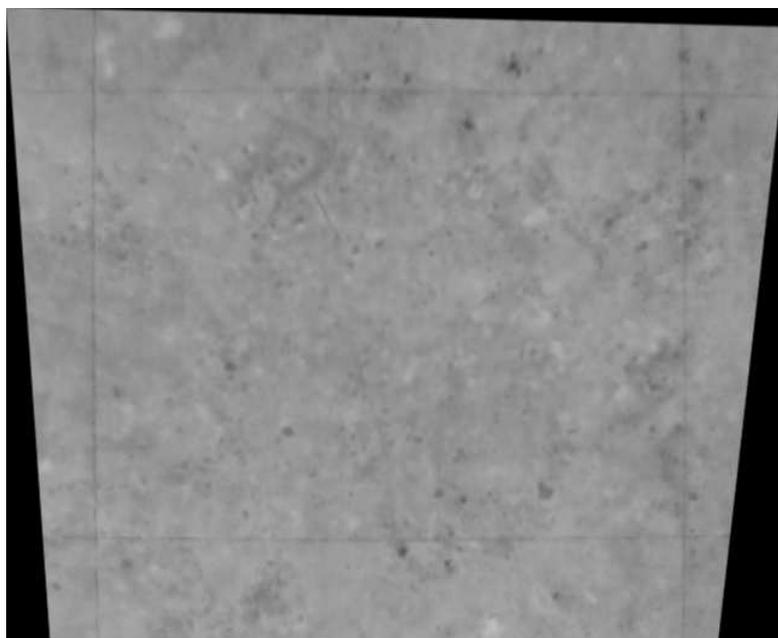


Figura 6.15: Termogramma dopo la georeferenziazione

che, espressa in funzione delle grandezze elencate, ne rappresenta una sintesi particolarmente significativa nello studio dei fenomeni termici transitori.

Il software tuttavia, essendo progettato per trattare situazioni di assoluta generalità, non consente di impostare direttamente questa grandezza ma richiede necessariamente tutte e tre le variabili. Materiali che presentano analoga diffusività termica pur con combinazioni di densità e conduttività termica diversa presentano un comportamento termico analogo, quindi un'analogia evoluzione di temperatura sotto il medesimo carico termico, ed in presenza di analoghe condizioni al contorno. Per l'analisi agli elementi finiti si è fatto uso del software Ansys, di comprovata affidabilità, e si è fatto uso di elementi Brick a 8 nodi caratterizzati ciascuno da specifici valori di densità, conduttività termica, calore specifico, e quindi diffusività termica. Ciascun elemento finito di tipo Brick costituiva un elemento discretizzante il volume complessivo sottoposto ad analisi e, nell'impostazione dell'algoritmo

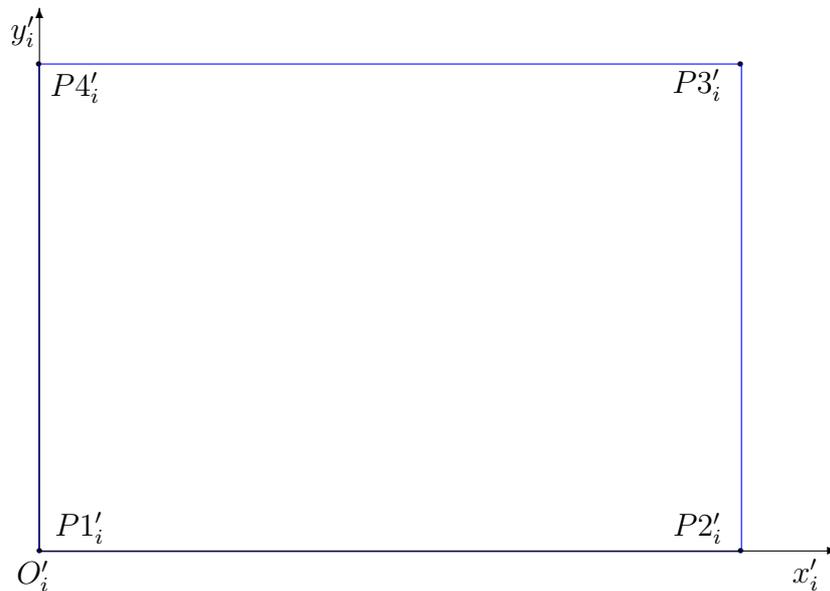


Figura 6.16: Sistema di riferimento del termogramma ortonormalizzato

risolutivo della teoria degli elementi finiti, una parte del sistema di equazioni differenziali la cui soluzione rappresenta il risultato del problema diretto.

6.6.4 Inversione

Il processo di inversione è un processo inverso rispetto al problema diretto e consiste nel ricavare, noto il carico termico applicato e la risposta termica della superficie limite superiore del modello, le proprietà termiche dei voxel (volumi elementari in cui è stato discretizzato il volume complessivo e a cui corrisponde un elemento finito dell'analisi agli elementi finiti), singole celle che costituiscono il modello. Per i problemi in cui non è nota una soluzione esatta del problema inverso è necessario operare in maniera iterativa (Cardarelli & Puledda, 1995).

1. si parte da un modello approssimativo di partenza;

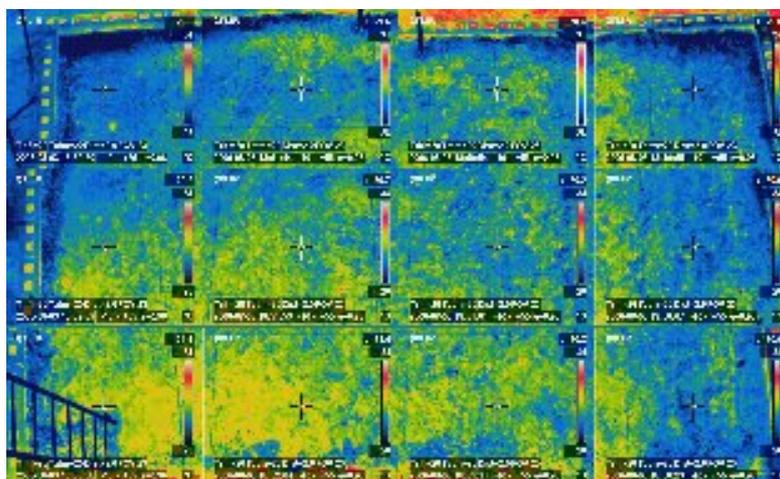


Figura 6.17: Mosaico dei termogrammi grezzi

2. si applicano a tale modello (nel nostro caso un modello agli elementi finiti) i carichi termici rilevati nel caso reale;
3. si esegue l'analisi del modello che fornisce la risposta termica del modello di tentativo;
4. si esegue un confronto fra i risultati dell'analisi e i valori misurati nel caso reale;
5. si valuta una grandezza che quantifichi la differenza di comportamento tra i due valori calcolati e i valori misurati;
6. si ripetono i punti 2, 3, 4 fino a minimizzare la grandezza calcolata al punto 5.

Se la differenza tra il comportamento del modello numerico nell'analisi e il caso reale sono sufficientemente ridotte si arriva alla conclusione che tale modello esprime le proprietà termiche incognite del volume analizzato.

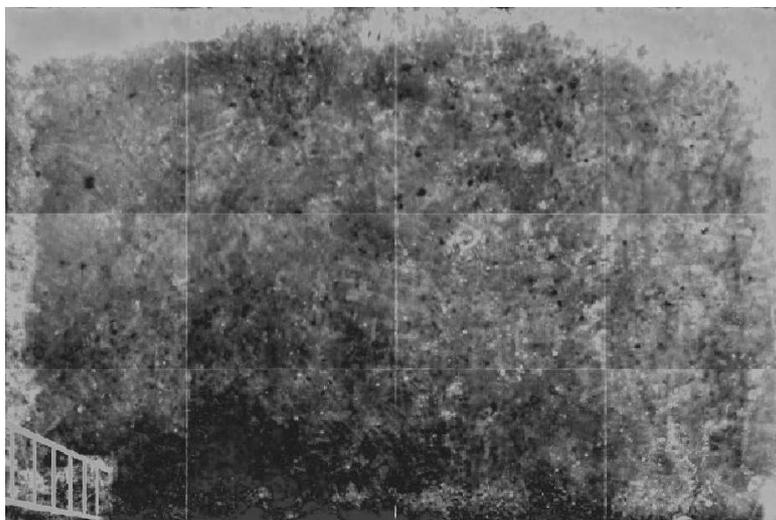


Figura 6.18: Ricostruzione a mosaico dei termogrammi georeferenziati

Il modello di partenza

Il modello di partenza è stato calcolato partendo da alcune considerazioni empiriche. Considerando il volume costituito da n voxel siano G_1, G_2, \dots, G_n i valori di una grandezza significativa, del nostro modello rispettivamente riferite al voxel V_1, V_2, \dots, V_n . Si considerino quindi m punti P_1, P_2, \dots, P_m , disposti sulla superficie limite superiore del modello, preferibilmente su una griglia regolare. Consideriamo il j -esimo voxel del modello

$$\begin{cases} G_i = \bar{G} & \text{se } i \neq j \\ G_i = \bar{G} + \Delta G_i & \text{se } i = j \end{cases} \quad (6.9)$$

Eseguendo l'analisi agli elementi finiti del modello i cui voxel sono caratterizzate dalla grandezza sopra scritta, essa produrrà in output i valori di temperatura T_1, T_2, \dots, T_m dei diversi punti della superficie limite superiore in o istanti temporali t_1, t_2, \dots, t_o . Per l' i -esimo punto sulla superficie limite, nell'istante temporale t_k sarà possibile valutare:

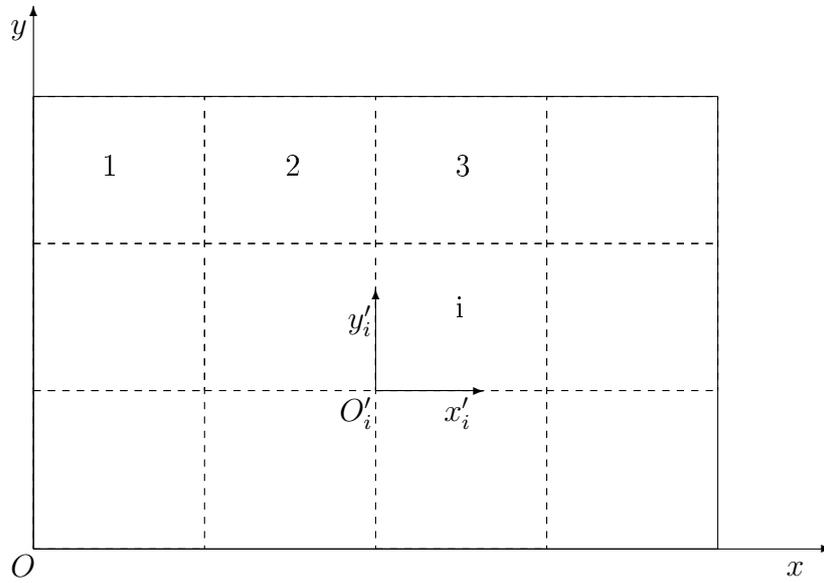


Figura 6.19: Sistema di riferimento del mosaico di termogrammi ortonormalizzati

$$\Delta T_{i,j,k} = T_{i,j,k} - \overline{T_{j,k}} \quad (6.10)$$

Indicando con $\overline{T_{j,k}}$ il valore della temperatura media della superficie limite, il valore $\Delta T_{i,j,k}$ esprimerà lo scostamento della temperatura del punto P_i dalla temperatura media della superficie limite $\overline{T_{j,k}}$, per effetto di un'anomalia di proprietà termica $\Delta \overline{G}$ nel voxel j ; il tutto valutato nell'istante temporale t_k . E' possibile allora esprimere una costante

$$K_{i,j,k} = \frac{\Delta T_{i,j,k}}{\Delta \overline{G}_i} \quad (6.11)$$

Ripetendo l'analisi per tutti gli n voxel del modello é possibile calcolare il valore di $K_{i,j,k}$ nei differenti istanti temporali. Considerando il punto sulla superficie limite P_i , il voxel j , e l'istante temporale t_k , é possibile individuare l'anomalia termica nel punto considerato in funzione dell'anomalia di proprietà termica rispetto al valore medio $\Delta \overline{G}_i$ nel voxel considerato.

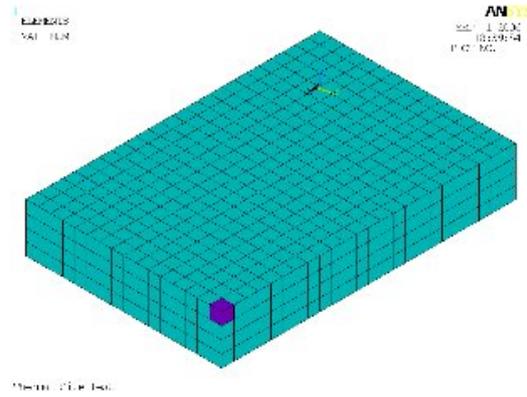


Figura 6.20: Mesh FEM con indicazione dell'elemento alterato

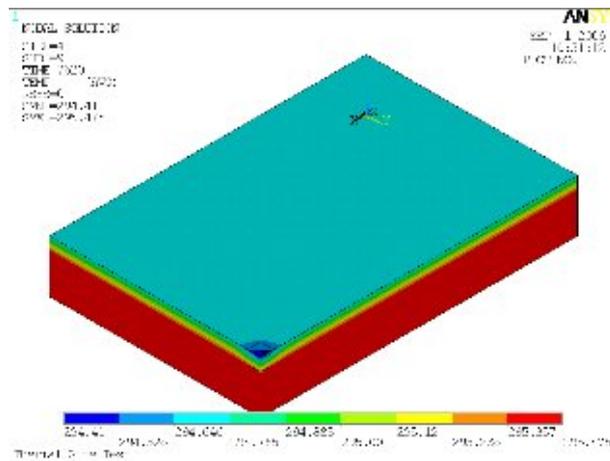


Figura 6.21: Mesh FEM con indicazione del risultato dell'analisi di cui alla figura precedente

$$\Delta T_{i,j,k} = K_{i,j,k} \Delta G_i \quad (6.12)$$

Ipotizzando la sovrapposizione degli effetti e il contributo complessivo di tutti i voxel del modello allora:

$$\Delta T_{i,k} = \sum_{i=0}^n K_{i,j,k} \Delta G_i \quad (6.13)$$

Ipotizziamo di aver eseguito la prospezione termica del modello e le successive elaborazioni. Sarà allora possibile individuare il valore di temperatura T_i , misurato nei punti P_i e i conseguenti scostamenti $\Delta T_{i,k}$ dalla temperatura media della superficie. Sarà allora possibile impostare un sistema del tipo seguente per ciascuno degli istanti temporali considerati:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{1,1,k} \Delta G_1 + K_{1,2,k} \Delta G_2 + \dots + K_{1,n,k} \Delta G_n = \Delta T_{1,k} \\ K_{2,1,k} \Delta G_1 + K_{2,2,k} \Delta G_2 + \dots + K_{2,n,k} \Delta G_n = \Delta T_{2,k} \\ K_{3,1,k} \Delta G_1 + K_{3,2,k} \Delta G_2 + \dots + K_{3,n,k} \Delta G_n = \Delta T_{3,k} \\ \dots \\ K_{m,1,k} \Delta G_1 + K_{m,2,k} \Delta G_2 + \dots + K_{m,n,k} \Delta G_n = \Delta T_{m,k} \end{array} \right. \quad (6.14)$$

(6.9)

In tale sistema di equazioni i valori $\Delta T_{i,k}$ rappresentano gli scarti tra la temperatura media della superficie all'istante t_k e possono essere facilmente calcolati a partire dai dati sperimentali. I valori dei coefficienti $K_{i,j,k}$ sono calcolabili attraverso l'analisi agli elementi finiti. I valori ΔG_i rappresentano l'anomalia incognita di proprietà termica del materiale che può essere determinata attraverso la soluzione del sistema ai minimi quadrati.

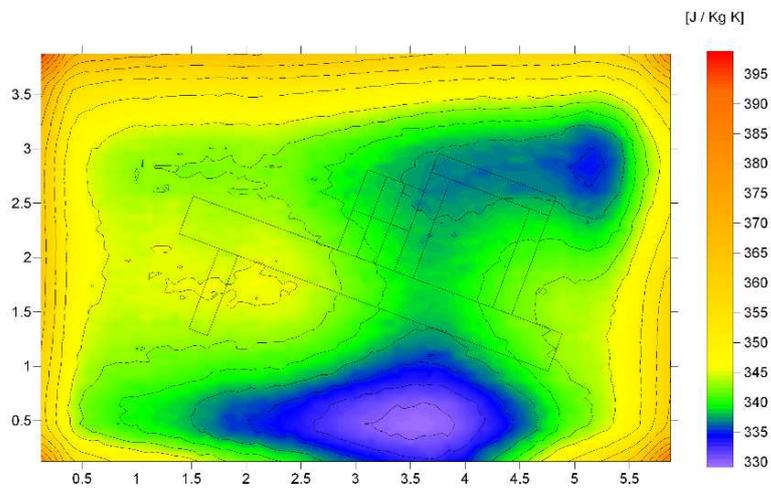


Figura 6.22: Risultato inversione

6.7 Risultati

L'elaborazione teorica e la sperimentazione pratica dello studio illustrato nel presente capitolo, partendo dall'impostazione metodologica della tomografia elettrica e servendosi delle analogie esistenti fra il campo elettrico e quello termico, ha consentito di mettere a punto una metodologia di indagine innovativa i cui primi risultati si sono dimostrati incoraggianti. Il metodo è stato applicato sul modello realizzato e descritto nel presente capitolo: L'esperimento è stato realizzato attraverso :

1. 4 dataset di 12 termogrammi ciascuno;
2. i 12 termogrammi ortorettificati di ciascun dataset sono stati composti a mosaico per ottenere l'immagine termica dell'intero modello in 4 differenti istanti temporali;
3. un modello numerico agli elementi finiti del sito di prova è stato analizzato attraverso il software agli elementi finiti ANSYS per valutare

l'influenza che ciascun voxel del modello possiede nella definizione della temperatura superficiale dello stesso ;

4. proiettando all'indietro (backprojection) i risultati dell'analisi termica sui parametri del modello è stato possibile ottenere una prima distribuzione della proprietà termica considerata.

Il volume è stato suddiviso in 1526 celle di 25 cm x 25 cm x 25 cm distribuite su 4 livelli. La proprietà termica media del modello agli elementi finiti è stata calcolata in base all'evoluzione temporale della temperatura media del modello. Eseguendo quindi l'analisi agli elementi finiti e la successiva elaborazione dei termogrammi è stato possibile ricavare l'anomalia riconducibile alla presenza della struttura interrata per il livello dei voxel più superficiale. I livelli dei voxel a profondità maggiore hanno invece risentito della durata limitata dell'analisi e del rumore delle misure di temperatura. Mentre l'immagine tomografica grezza non ha evidenziato la presenza di alcuna anomalia significativa (fig.6.18), l'elaborazione successiva, pur mostrando un significativo effetto di bordo, ha evidenziato la presenza di un'anomalia termica riconducibile ai livelli più superficiali della muratura interrata. (fig. 19). La limitata durata dell'acquisizione (120 minuti) non ha consentito di indagare a maggiore profondità. Inoltre la dimensione dei voxel (e quindi la risoluzione laterale) è stata tenuta dello stesso ordine della dimensione minima del muro e dello spessore della copertura. Una diminuzione delle dimensioni dei voxel avrebbe comportato un aumento del loro numero e un conseguente aumento del tempo di elaborazione o l'uso di calcolatori più potenti e veloci. L'inversione dei dati ha comunque consentito di rivelare la presenza dell'elemento sepolto sebbene non esattamente la sua geometria. I limiti principali della metodica messa a punto sono da rintracciarsi nel fatto che all'aumentare della profondità l'influenza delle proprietà termiche del materiale sulla

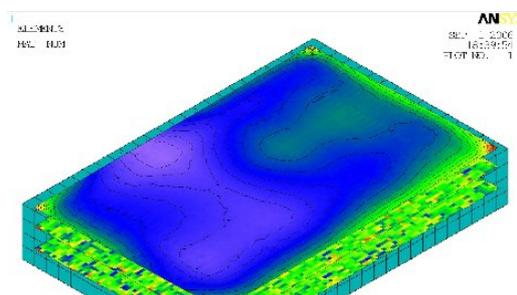


Figura 6.23: Inserimento dei risultati dell'inversione nel modello FEM 3D

temperatura superficiale aumentano notevolmente e la backprojection della temperatura sulle proprietà termiche del materiale amplifica la componente di rumore delle misure sovrapponendosi all'informazione utile. La profondità massima investigata è quindi legata:

1. Alla durata dell'acquisizione, in quanto l'influenza delle profondità maggiori del sito si manifesta per tempi di osservazione delle misure significativi
2. Alla precisione delle misure e quindi a limiti di natura tecnica sono insiti nella strumentazione di misura.

Il primo punto può essere superato prolungando il tempo di osservazione termografica fino al limite massimo di dodici ore circa, pari alla durata della notte, mentre il secondo punto risulta di soluzione più complessa. Proprio per il superamento di tali limiti si è proseguito il lavoro verso lo studio dei fenomeni di propagazione delle onde termiche che è illustrato nel capitolo seguente.

La registrazione della temperatura dell'aria durante il test e la stima del coefficiente di convezione permette una simulazione del comportamento medio del modello analoga al caso reale. Grazie a questo sistema che rappresenta il primo passo verso la creazione di un algoritmo per la tomografia termica, è stato possibile descrivere la distribuzione tridimensionale di capacità termica

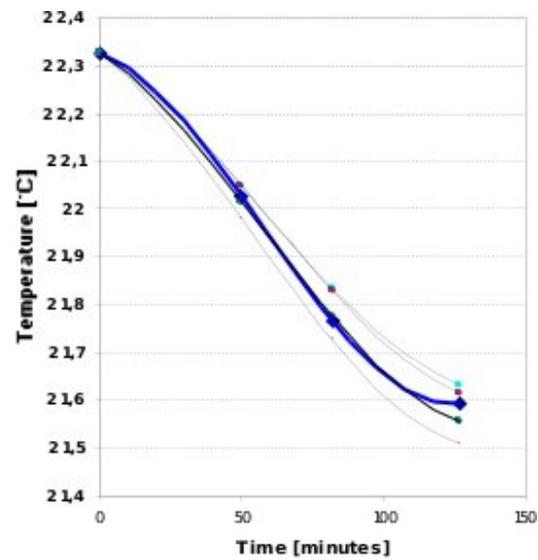


Figura 6.24: Confronto tra evoluzioni di temperatura media rilevata ed elaborata dal modello FEM

nel volume modellizzato in funzione solo dei valori di temperatura registrati in superficie con metodologia termografica.

Capitolo 7

Analogia termica-sismica

7.1 Introduzione

L'analogia tra le modalità di misura sismica ed elettrica si fonda sul fatto che entrambi i fenomeni si basano sulla teoria ondulatoria. Le onde sismiche e le onde termiche presentano tuttavia un'importante differenza: le onde termiche, infatti, a differenza delle onde sismiche sono onde diffusive che subiscono un'attenuazione molto più rapida, in termini di distanza, rispetto alle onde sismiche. Queste ultime infatti possono propagarsi anche a notevole distanza dalla sorgente mentre le onde termiche subiscono un'attenuazione significativa e si dice infatti convenzionalmente che non si propagano a distanze superiori ad una lunghezza d'onda. In realtà la propagazione di queste onde avviene anche per distanze maggiori pur con attenuazione di ampiezza molto elevata, e la loro rilevabilità è quindi legata alla sensibilità strumentale ed al rumore di fondo presente. Questo aspetto non deve necessariamente essere considerato un limite in quanto la ridotta distanza di propagazione può consentire di rilevare con maggiore risoluzione la presenza di anomalie prossime alla sorgente senza preoccuparsi di eventuali fenomeni di rifrazione

o riflessione provenienti da anomalie significativamente distanti che invece possono disturbare le misure basate sui tempi di propagazione delle onde sismiche-meccaniche. Le principali difficoltà che possono essere incontrate nell'utilizzo di questo genere di onde sono di natura fisicomatematica e di natura tecnico-pratica. Le onde termiche vengono utilizzate nella diagnostica dei materiali e nelle indagini termografiche di tipo lockin e la generazione dell'onda è attuata attraverso l'irraggiamento di un fascio luminoso periodico di intensità modulata ad una precisa frequenza. L'oscillazione di temperatura conseguente è quindi sbilanciata verso l'alto. Il valore di temperatura media rilevabile sulla superficie del provino (l'offset del segnale) non coincide con la temperatura dello stesso in stato indisturbato. Al più il picco negativo dell'oscillazione di temperatura sulla superficie può assumere tale valore. Conseguentemente l'ampiezza massima dell'energizzazione è pari alla differenza tra la temperatura massima sopportabile dal provino e la temperatura ambiente. A livello teorico l'optimum è quello di energizzare con un'onda termica di ampiezza pari alla differenza tra la temperatura massima sopportabile dal provino e la temperatura minima, solitamente pari a 0°C per evitare la formazione di ghiaccio nel materiale, in presenza di acqua nel provino e comunque per evitare il congelamento dell'umidità eventualmente presente nell'aria presente in porosità o cavità interne. Per raggiungere tale risultato è però necessario operare non solo attraverso riscaldamento ma ricorrendo ad un'azione combinata di riscaldamento e raffreddamento del provino. Supponendo una temperatura ambientale di 20°C e una temperatura massima sopportabile dal provino di 50°C , utilizzando un'energizzazione con un fascio luminoso modulato, l'ampiezza massima, difficilmente ottenibile nella pratica in quanto il raffreddamento non è sufficientemente rapido per temperature del provino prossime alla temperatura ambiente, è pari a

30 °C mentre si potrebbe raggiungere con l'utilizzo combinato di raffreddamento e riscaldamento un'ampiezza di 50 °C. Durante il presente studio si é giunti alla soluzione che per applicazioni pratiche che richiedono di indagare profonditá superiori a 5-10 cm assume un'importanza maggiore l'ampiezza dell'oscillazione di temperatura piuttosto che il vantaggio di un'indagine assolutamente senza contatto. Si é presentata quindi la necessitá di servirsi di un dispositivo capace di generare un flusso di calore per conduzione capace di operare in modo simmetrico sia nel verso della trasmissione di calore nel provino, sia nell'estrazione di calore dallo stesso. Tale genere di dispositivo non esiste sul mercato pertanto é stato necessario progettarlo e costruirlo.

7.2 L'acquisizione

7.2.1 Il dispositivo energizzante

L'effetto Peltier

L'effetto Peltier si sviluppa in corrispondenza della giunzione tra due metalli con caratteristiche elettro-termiche opportune, in relazione al passaggio di una corrente elettrica. Risulta un comportamento analogo a quello sfruttato nelle termocoppie per la misura della temperatura ma applicato in modo opposto: nella termocoppia si utilizza la differenza di potenziale misurata quale conseguenza dello stato termico della giunzione, nella cella di Peltier si induce una corrente elettrica nella giunzione per osservare un effetto termico. L'effetto Peltier può essere annoverato entro il piú ampio insieme degli effetti termoelettrici assieme all'effetto Seebeck e all'effetto Thomson. L'effetto Peltier-Seebeck o effetto termoelettrico rappresenta una conversione diretta di un differenziale termico in una tensione elettrica o viceversa. Gli effetti

Thomson e Joule possono essere considerati degli effetti correlati. Gli effetti Peltier-Seebeck e Thomson sono effetti reversibili mentre l'effetto Joule non è un effetto reversibile. L'effetto Seebeck è stato scoperto accidentalmente nel 1821 dal fisico tedesco Thomas Johann Seebeck, il quale si rese conto della presenza di un potenziale elettrico alle estremità di una barra metallica quando nella barra stessa era presente una differenza di temperatura ΔT . Si rese inoltre conto che l'ago di una bussola veniva deviato quando veniva posto in prossimità di una spira chiusa realizzata con due differenti metalli posti a temperatura differente. L'effetto Seebeck è essenzialmente la presenza di una differenza di potenziale in conseguenza ad una differenza di temperatura tra due metalli o semiconduttori. Ciò causa un flusso di corrente nei conduttori qualora essi formino un circuito chiuso. La tensione creata è dell'ordine di qualche microvolt per grado di differenza di temperatura.

L'energizzatore termico

L'energizzatore termico è stato costruito intorno ad un modulo termoelettrico del tipo a cella di Peltier (modulo TEM). Tale modulo è materialmente costituito da una piastra di dimensioni 40 mm x 40 mm x 10 mm rivestito sulla superficie superiore e inferiore da un materiale ceramico da cui fuoriescono i due conduttori elettrici che alimentano il modulo. Il flusso di calore conseguente alla circolazione di corrente all'interno del modulo causa una trasformazione da energia elettrica ad energia termica per effetto Joule legata alla resistenza elettrica del modulo. Tale calore si trasmette per conduzione alle due superfici del modulo. E' presente inoltre una trasmissione di calore per effetto Peltier tra una superficie e l'altra del modulo proporzionale al verso e all'intensità della corrente che circola nel modulo stesso con costante di proporzionalità pari alla costante di Peltier. Una superficie del modulo

di Peltier é a contatto con uno scambiatore di calore ad acqua, realizzato in rame, che ha la funzione di mantenere tale superficie ad una temperatura costante pari alla temperatura ambiente attraverso il trasferimento di calore attuato da un liquido refrigerante fatto circolare da una pompa all'interno di un circuito in cui é inserito un radiatore su cui viene opportunamente forzato un flusso d'aria. La seconda superficie del modulo viene messa a contatto con un elemento di alluminio dotato di un trasduttore di temperatura che, a contatto con l'elemento da indagare, estrae o inietta un flusso di calore legato alla corrente elettrica fatta circolare nel modulo stesso. La modulazione di tale flusso di calore per l'ottenimento dell'onda termica desiderata é operata quindi attraverso la modulazione della corrente che alimenta il modulo. Per tale scopo ci si é serviti di una scheda di interfaccia.

Schema di funzionamento del dispositivo

Il dispositivo di energizzazione é costituito da tre moduli:

1. modulo di stabilizzazione di temperatura;
2. modulo di alimentazione e controllo;
3. modulo di iniezione del calore.

Modulo di stabilizzazione della temperatura

Il modulo di stabilizzazione della temperatura é costituito da quella parte del dispositivo che si occupa di scambiare il calore sottratto o ceduto al provino e smaltire quello generato per effetto Joule.

Il modulo di stabilizzazione di temperatura é a sua volta costituito dai seguenti blocchi funzionali:

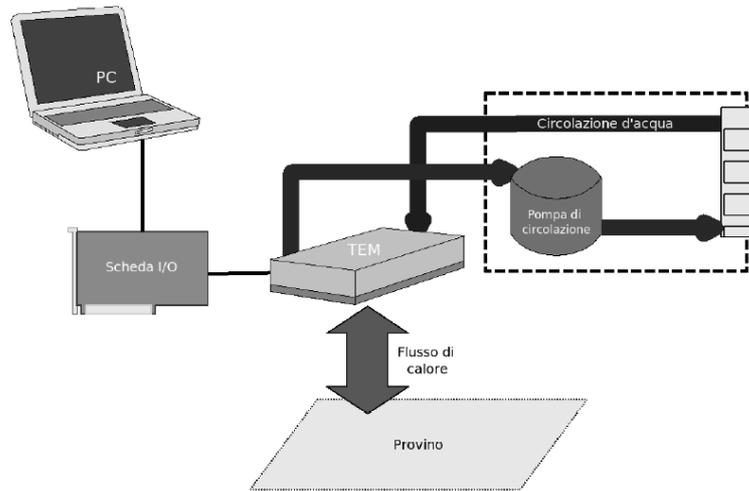


Figura 7.1: Schema a blocchi del dispositivo di generazione delle onde termiche

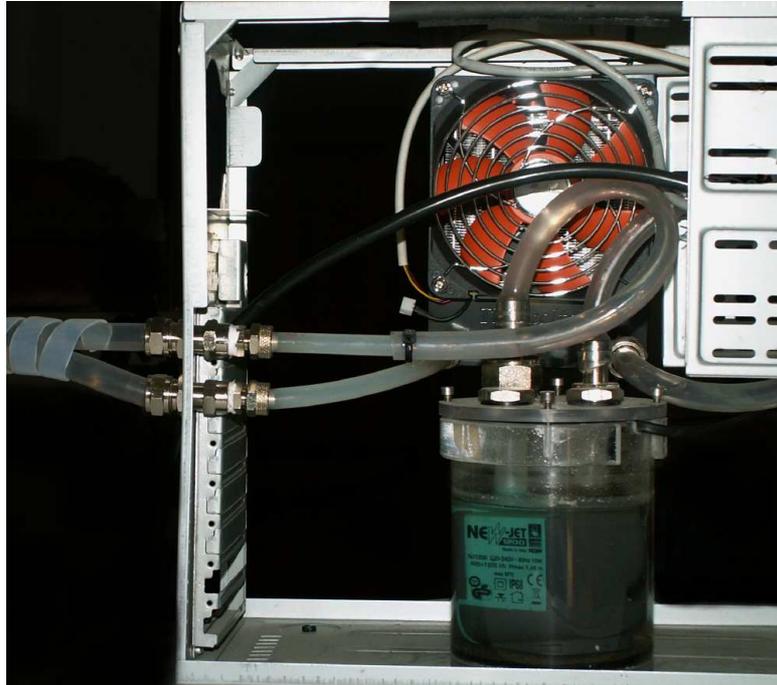


Figura 7.2: Vista del modulo di stabilizzazione di temperatura

- Pompa di circolazione. La pompa di circolazione é costituita da un contenitore cilindrico in plexiglass, all'interno del quale é disposta una piccola pompa sommersa che mette in pressione il circuito nel quale circola il fluido termovettore.
- Radiatore. Il fluido termovettore raggiunge attraverso il circuito un radiatore in alluminio su cui é fissato un ventilatore assiale. Il flusso d'aria conseguente lambisce le lamelle del radiatore stabilizzando la temperatura del fluido al valore di temperatura ambiente.
- Connessioni. Il telaio contenente il dispositivo é fornito di due connessioni idrauliche per la mandata ed il ritorno del fluido.

Modulo di alimentazione e controllo.

Il modulo di alimentazione e controllo é composto dai seguenti moduli:

- Alimentatore. L'alimentatore trasforma la tensione presente sulla linea AC 220 V in tensione DC 12 V stabilizzata.
- Scheda di interfaccia I/O. Un personal computer fornisce la possibilitá di operare un controllo del funzionamento del dispositivo secondo logiche sufficientemente intelligenti da garantire la generazione di un flusso di calore controllato in termini di ampiezza e di periodo. La scheda di interfacciamento modello PMD-12 dispone di 8 ingressi analogici, 8 ingressi digitali e 8 uscite digitali. L'interfacciamento al PC é realizzato attraverso il bus Universal Serial Bus. I livelli di uscita della scheda di interfacciamento sono in logica TTL quindi non possono alimentare direttamente il modulo TEM che richiede invece una tensione di alimentazione DC 12V e un'elevata corrente. E' stato quindi necessario

realizzare una scheda di interfacciamento apposita che utilizzando i segnali logici in output dalla scheda di interfaccia, pilota attraverso una serie di transistor driver due relay di tipo automotive in grado di commutare le elevate correnti richieste dal modulo. La modulazione della potenza termica del modulo TEM può essere realizzata attraverso una riduzione della tensione di alimentazione del modulo, ma ciò avrebbe aumentato la complessità del dispositivo, o una commutazione ciclica dell'alimentazione (tecnologia switching) che prevede di suddividere un certo intervallo di tempo di alimentazione del dispositivo in due periodi, uno durante il quale viene effettivamente fornita alimentazione (stato ON), e uno durante il quale non viene fornita alimentazione (stato OFF). Tale sequenza di accensioni e spegnimenti, opportunamente calcolati e che si ripetono nel tempo, consentono di modulare la potenza termica del modulo TEM. Il rapporto tra la durata del periodo ON e del periodo OFF fornisce un fattore di riduzione della potenza nominale del modulo TEM alimentato senza operare un controllo sulla tensione di alimentazione. Si tratta in effetti di un'onda quadra ma con commutazioni sufficientemente rapide da essere compensate dall'inerzia termica del complesso sonda-modello operando in effetti come una modulazione di ampiezza in tecnologia PWM (Pulse Width Modulation).

Modulo di iniezione del calore

- Scambiatore di calore.

E' composto da uno scambiatore di calore ricavato dalla fresatura di un blocco di rame di 40 mm x 40 mm x 30 mm. Una faccia dello scambiatore é posta a diretto contatto con la cella di Peltier attraverso una giunzione realizzata con grasso siliconico ad elevata conducibilità

termica per consentire un efficace trasferimento di calore. Sulla seconda faccia sono presenti i raccordi idraulici che collegano lo scambiatore ai tubi di mandata e ritorno del fluido termovettore destinato all'unità di stabilizzazione di temperatura.

- Cella di Peltier.

La cella di Peltier é disposta tra lo scambiatore di calore, come detto al punto precedente, e una piastra di alluminio. La superficie a contatto con lo scambiatore di calore viene mantenuta ad una temperatura pressochè costante e su questo elemento avviene il trasferimento di calore iniettato o estratto dal materiale ispezionato ad opera della cella stessa.

- Piastra di trasferimento.

Si tratta di un elemento metallico la cui unica funzione é quella di realizzare il trasferimento di calore dal provino alla cella di Peltier, proteggendo la superficie ceramica della cella dal contatto diretto con la superficie del provino.

Il software di controllo

Il software di controllo del dispositivo energizzante nasce dalla necessità di poter controllare in tempo reale il funzionamento della cella di Peltier secondo le specifiche necessità e quindi controllare il periodo e l'ampiezza dell'onda termica generata. Il software si deve anche preoccupare di fornire il segnale che alimenta la cella di Peltier secondo la logica di funzionamento switching descritta precedentemente. Il software riceve quindi in input:

1. fattore di potenza in riscaldamento;



Figura 7.3: Modulo di iniezione dell'onda termica

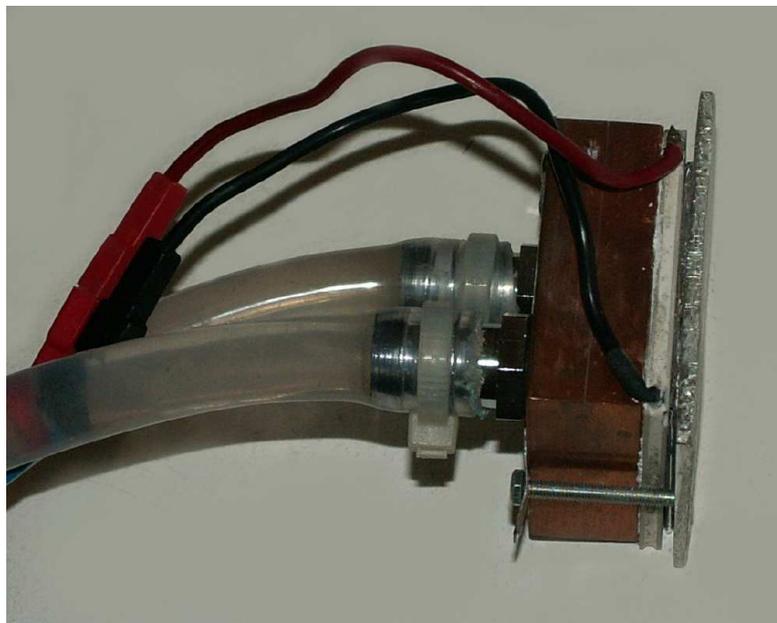


Figura 7.4: Dettaglio della cella di Peltier nel modulo di iniezione

2. fattore di potenza in raffreddamento;
3. periodo dell'onda termica.

In conseguenza di questi parametri genera in output:

1. l'andamento sinusoidale teorico della temperatura;
2. due onde quadre che pilotano i relay di alimentazione del modulo TEM.

rispettivamente in riscaldamento ed in raffreddamento

Metodica operativa

Da un punto di vista operativo l'utilizzo del dispositivo energizzante avviene secondo le seguenti modalità.

1. si individua la posizione sul provino in cui eseguire l'energizzazione termica, si dispone in tale posizione il modulo di iniezione del calore facendo attenzione che esista un buon contatto tra la piastra di alluminio ed il provino, eventualmente interponendo degli spessori di materiale buon conduttore termico;
2. sul software di controllo si sceglie il periodo di energizzazione ed i fattori di potenza in riscaldamento ed in raffreddamento di primo tentativo;
3. si avvia l'alimentazione del dispositivo e si correggono i fattori di potenza per garantire un buon bilanciamento dell'onda termica in riscaldamento ed in raffreddamento

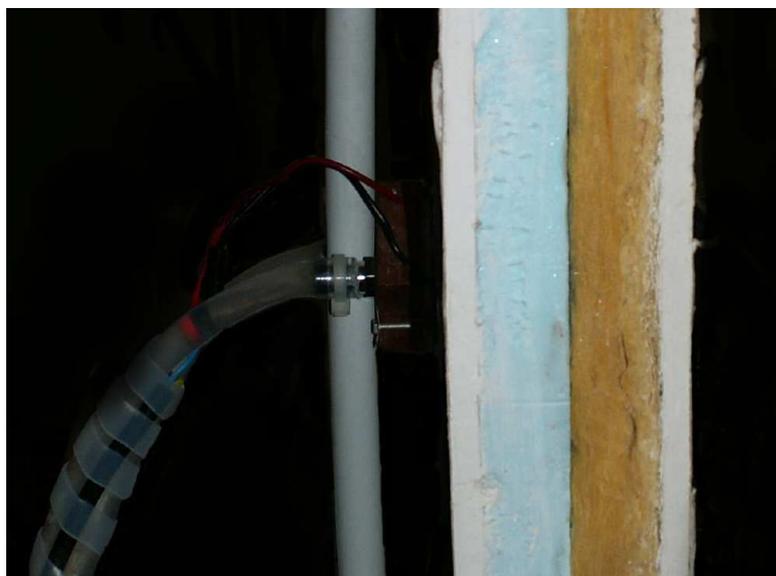


Figura 7.5: Disposizione della sonda sul modello

7.2.2 Modello di prova

Il modello utilizzato per la realizzazione delle prove é costituito da quattro strati di diverso spessore. Gli strati piú esterni sono costituiti da lastre di cartongesso dello spessore di 1cm, fra questi strati esterni sono presenti internamente due strati di materiali termicamente isolanti quali il polistirene estruso ad alta densitá (4cm) e la lana di roccia (4cm). Complessivamente il modello presenta quindi uno spessore di 8cm, una larghezza di 140cm ed un'altezza di 100cm. I materiali di cui il modello é composto sono stati scelti fra i migliori isolanti termici, appositamente per valutare la capacitá dell'onda termica di propagarsi anche dove le condizioni di propagazione termica non fossero ottimali. All'interno del modello, in posizione centrale, nello strato di polistirene estruso é stata ricavata una nicchia di dimensione 15 cm x 7 cm x 3 cm all'interno della quale poter inserire corpi anomali differenti (alluminio, legno, PVC) di dimensioni corrispondenti, per valutare la capacitá di rilevare e riconoscere la presenza di tale genere di anomalie.



Figura 7.6: Vista in sezione dei materiali che costituiscono il modello



Figura 7.7: Vista prospettica del modello



Figura 7.8: Dettaglio della nicchia ricavata nel modello



Figura 7.9: Dettaglio della nicchia contenente un provino di legno

7.3 L'elaborazione

7.3.1 Finalità delle misure

Come già detto nell'introduzione del presente capitolo, le tecniche di indagine termografica che individuano le anomalie del provino attraverso l'analisi di onde termiche sono principalmente le tecniche LT e PPT. Tali tecniche sono però finalizzate all'analisi degli strati più superficiali del materiale, volendo invece valutare la possibilità di servirsi della misura delle grandezze caratteristiche delle onde termiche per l'analisi di profondità maggiori di qualche cm si è scelto di costruire l'energizzatore descritto al paragrafo precedente. Le tecniche di imaging termico già sviluppate non risultano adatte a tale genere di applicazione. Infatti esse si basano sulla supposizione teorica di una propagazione piana dell'onda termica dalla superficie verso gli strati posti a profondità maggiori. Utilizzando un dispositivo energizzante del tipo descritto, la propagazione dell'onda termica non risulterebbe più piana ma sarebbe assimilabile alla propagazione dell'onda da una sorgente di tipo puntuale. Una propagazione dell'onda di questo tipo trova significative analogie con la propagazione di un'onda sismica da una sorgente verso i geofoni. Questi ultimi si configurano come gli elementi di rivelazione dell'onda sismica e trasformano una velocità o un'accelerazione di un punto della superficie del terreno in un segnale elettrico, così come i singoli pixel del bolometro della termocamera su cui è focalizzata l'immagine di una superficie trasformano la radianza infrarossa in un segnale elettrico, convertito in una temperatura attraverso un algoritmo software. Da un punto di vista teorico i due fenomeni risultano assimilabili con le due differenze fondamentali:

- l'onda termica risulta un'onda di tipo diffusivo;

- la rivelazione dell'onda termica avviene senza contatto fisico.

Poichè il tipo di indagine considerata risulta finalizzata ad estendere il più possibile la profondità dell'indagine, dovendo scegliere fra la realizzazione di misure per trasparenza o per riflessione si è optato per la prima possibilità, in quanto in questo caso il percorso dell'onda termica per raggiungere l'anomalia, e quindi l'attenuazione che subisce l'onda, risulta dimezzato rispetto all'analisi per riflessione. Il dispositivo di energizzazione e la termocamera saranno quindi disposti su due facce opposte del mezzo investigato. L'obiettivo dell'esperimento è quello di valutare la possibilità di riconoscere dalle misure termografiche la presenza dei diversi materiali in termini di stratigrafica, e l'individuazione della geometria dell'anomalia e delle proprietà termiche delle stesse in particolare la diffusività termica della stessa. Senza escludere la possibilità di ricorrere ad elaborazioni analoghe cercando di evidenziare le possibili riflessioni di onde termiche qualora non fosse possibile l'accesso ad entrambi i lati del provino.

7.3.2 La misura termografica

Come già detto, la termocamera è stata disposta nel modello su un lato opposto rispetto all'energizzatore termico, ad una distanza di circa 2 metri dallo stesso. I dati necessari per l'analisi sono le variazioni di temperatura sulla superficie inquadrata in funzione del tempo. La quantità di informazioni necessarie per l'analisi è notevole. Infatti, considerato che la termocamera ha una risoluzione di 640x480 pixel e che l'informazione corrispondente a ciascun pixel viene rappresentata con una risoluzione di 16 bit, ciascuna immagine occupa 600kB di memoria. Per studiare l'evoluzione di temperatura dell'onda termica in un materiale quale quello del modello sono necessarie svariate ore di acquisizione e la mole complessiva di dati può superare i 600 MB di

memoria. La necessità inoltre di operare sull'immagine stessa delle elaborazioni in tempo reale per ottimizzare la misura in itinere ha fatto optare per la scrittura di un software apposito, eseguito sullo stesso PC che gestisce il dispositivo di energizzazione, che controlla remotamente la termocamera e memorizza i dati su unità di memoria di massa nella forma più opportuna anche in relazione alla necessità della successiva elaborazione della misura termografica. La termocamera è in grado di fornire sia valori di temperatura che valori di radianza infrarossa. Questi ultimi sono i valori che effettivamente il bolometro della termocamera misura, i valori di temperatura vengono ricavati attraverso la formula di misurazione ed i parametri (emissività, temperatura ambiente, etc) impostati sul software. I valori di temperatura sono quindi sensibili ad errori legati ad una variazione dei suddetti parametri e ad errori di modellizzazione impliciti nella formula di misurazione. L'accuratezza della misura di temperatura, pari a 2°C , può risultare un parametro limitante in misure che interessano elevate distanze di propagazione in quanto le elaborazioni successive (differenze di temperatura nel tempo) potrebbero amplificare tale errore.

Una delle ragioni principali per la quale si è optato per l'utilizzo delle onde termiche è rappresentato dal fatto che su questo genere di fenomeni fisici è possibile operare prescindendo da una precisa misurazione di temperatura ma l'accuratezza della misura è legata alla precisione della misura nel tempo. La misura della radianza consente di utilizzare l'elevata dinamica di questo segnale senza introdurre segnali spuri che derivano dalle elaborazioni successive legate alla formula di misurazione. Il software utilizzato durante l'acquisizione dei dati, risulta l'ambiente più adatto per la fase successiva di elaborazione. L'attenuazione che subisce l'onda termica durante la propagazione nei materiali che costituiscono il modello è infatti significativa, tuttavia

la grande quantità di informazioni disponibili consentono di estrarre il segnale utile discriminandolo dal rumore comunque presente. Il rumore presente nelle immagini termiche è legato:

1. al rumore elettrico dei componenti elettronici della termocamera;
2. al rumore generato da fenomeni termici diversi da quello artificiale di interesse;
3. alla differente risposta dei singoli pixel che compongono il sensore della termocamera.

L'utilizzo di un'onda termica generata in modo controllato consente di effettuare differenti filtraggi sul segnale, amplificando la componente di frequenza corrispondente all'onda energizzante e attenuando invece quelle differenti indesiderate. Inoltre la propagazione dell'onda termica sulla superficie inquadrata dalla termocamera deve necessariamente rispondere a vincoli di natura matematica legati alla sua natura ondulatoria e questo può ulteriormente contribuire a distinguerla dal rumore di fondo. L'aspetto di maggiore interesse della misura effettuata risulta senza dubbio la misura del tempo di propagazione dell'onda. E' noto infatti che un'onda termica si propaga nei mezzi con una velocità legata alla diffusività del mezzo indagato. Supponendo una stratificazione dei differenti materiali il tempo necessario all'onda per raggiungere un punto che presenta rispetto alla sorgente un determinato offset dipende dagli spessori e dalle velocità corrispondenti.

7.3.3 Il software

Il software sviluppato per la fase di acquisizione dei dati, risulta l'ambiente ideale nel quale realizzare le fasi successive di processamento. Le tecniche in

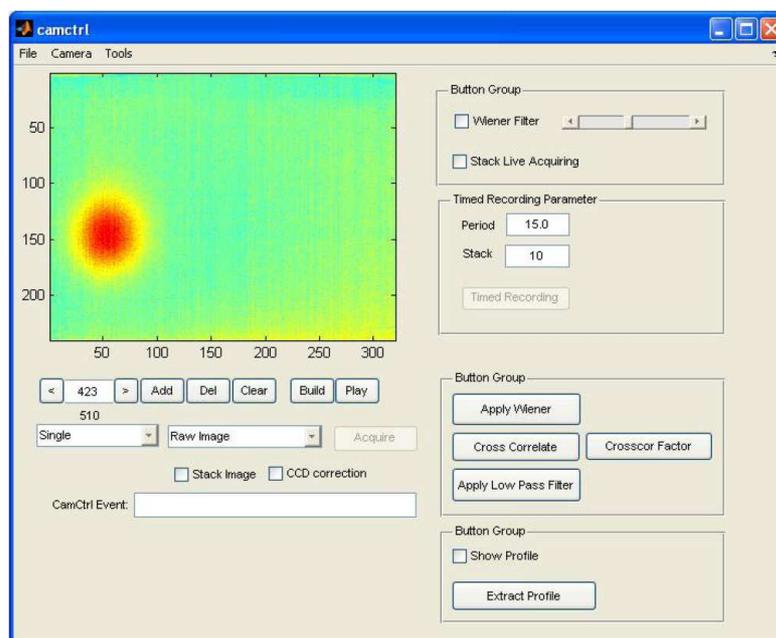


Figura 7.10: L'interfaccia del software

grado di ridurre l'elevata rumorosità delle misure termiche hanno richiesto un intenso lavoro di prova per il processamento delle misure termiche grezze.

La rumorosità spaziale e di filtraggio di Wien

I singoli pixel che compongono l'immagine termografica presentano una differente risposta alla radiazione infrarossa. Il software incorporato nella termocamera effettua periodicamente una ricalibrazione, operando una correzione dei parametri di taratura per correggere la mancanza di uniformità spaziale nell'immagine termografica. Se tale operazione è sufficiente per la precisione necessaria in un rilievo termografico convenzionale, tuttavia risulta insufficiente per il genere di applicazioni affrontate nel presente lavoro in cui si opera ai limiti di rilevabilità dello strumento.

Fra le differenti tecniche per la soluzione del problema della rumorosità spaziale la tecnica più efficace si è rilevata senza dubbio quella del filtraggio

con filtro di Wien. Il filtro di Wien opera un filtraggio di natura statistica basandosi sulla conoscenza delle caratteristiche spettrali del segnale e del rumore. Indicando con s il segnale filtrato, con g il filtro, con s il segnale originario prima della degradazione subita dal rumore e con n il rumore allora possiamo scrivere:

$$x(v) = g(v) * (s(v) + n(v)) \quad (7.1)$$

L'errore dell'operazione di filtraggio risulta espressa da

$$e(v) = s(v) - x(v) \quad (7.2)$$

e l'errore quadratico

$$e^2(v) = s^2(v) - 2s(v)x(v) + x^2(v) \quad (7.3)$$

Esprimendo $x(v)$ come integrale convoluzionale e operando una minimizzazione del valore atteso dell'errore quadratico risulterà possibile trovare i valori ottimali per il filtro $g(v)$. Nel caso specifico ci si è serviti della funzione `wien2` dell'ambiente Matlab. Tale funzione opera un filtraggio di Wien spaziale bidimensionale utilizzando un dominio di pixel all'interno del quale stima la media e la deviazione standard dell'immagine supponendo un rumore bianco Gaussiano addittivo e utilizza tali parametri per le successive elaborazioni.

Il software consente di operare un filtraggio sia esclusivamente in visualizzazione, contemporaneamente all'acquisizione dell'immagine, sia in fase di processing, direttamente sui dati memorizzati.

La prima modalità risulta efficace sia durante la registrazione dei termogrammi, consentendo di avere immediatamente disponibile un'immagine di

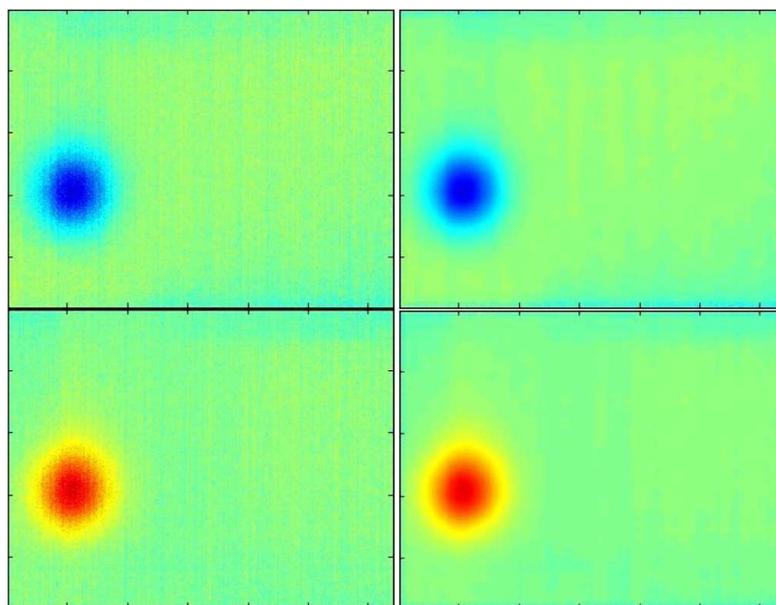


Figura 7.11: Esempio di filtraggio con filtro di Wiener, prima (a sinistra) e dopo (a destra)

limitata rumorosità e rendersi quindi subito conto della qualità dei dati, sia in fase di elaborazione valutando in modo ottimale la dimensione in pixel del dominio su cui operare il successivo definitivo filtraggio.

Il filtraggio nel dominio di frequenza

Lo spettro di frequenza del segnale di interesse è un parametro importantissimo per discriminare rumore e informazione utile. Nel caso di studio, operando un'energizzazione con un'onda termica di periodo noto, è possibile individuare con precisione la banda entro cui il segnale di interesse è contenuto, con la conseguenza di operare un'efficace filtraggio. Il software di acquisizione è stato quindi integrato con funzionalità adatte all'analisi di spettro e al filtraggio del segnale in ingresso. La prospezione termografica comprende una sequenza di immagini termografiche scattate con cadenza regolare. Isolando nella sequenza di immagini uno specifico pixel è possibile ricostruire il segna-

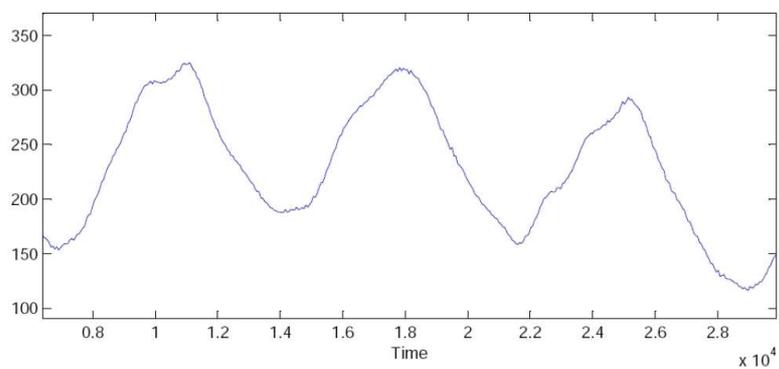


Figura 7.12: Evoluzione temporale del segnale di un pixel di una ripresa termografica. In ascisse secondi, in ordinate segnale grezzo di temperatura

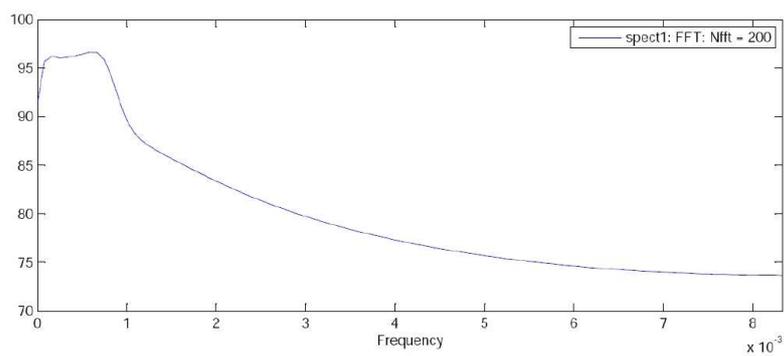


Figura 7.13: Analisi di spettro eseguita sul segnale di un pixel. In ascisse Hz, in ordinate ampiezze

le termico campionato $T(t)$ in intervalli temporali discreti $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ che individuano il periodo di campionamento $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ per un preciso punto della superficie inquadrata. All'interno del software è presente la possibilità di selezionare un singolo pixel dell'immagine termica e acquisire e rappresentarlo in forma grafica (figura 7.12). Il segnale di un pixel viene quindi importato nell'SPTool integrato nell'ambiente Matlab.

All'interno dell'SPTool è possibile:

1. visualizzare l'andamento temporale del segnale (figura 7.12);
2. implementare differenti tipi di filtraggio;
3. eseguire l'analisi di spettro del segnale (figura 7.13).

7.3.4 La crosscorrelazione

L'analisi della sequenza termografica è finalizzata allo studio delle modalità di propagazione di un'onda termica in un mezzo.

La visualizzazione dell'animazione attraverso un video, in cui a ciascun fotogramma corrisponde un termogramma, fornisce una rappresentazione qualitativa della propagazione dell'onda. Tuttavia perché sia possibile un'interpretazione di tipo quantitativo dell'analisi è necessario individuare una o più grandezze di interesse e definire le modalità attraverso le quali misurare tali grandezze. Il metodo di indagine sismico a rifrazione individua questa grandezza nel tempo di volo dell'onda sismica, dalla sorgente al ricevitore, ricavando successivamente, attraverso la definizione delle dromocrone e la loro interpretazione, la geometria delle interfaccie fra differenti strati e le velocità di propagazione negli stessi. Ovviamente trattandosi di un metodo di indagine specificatamente finalizzato all'indagine dei terreni, è un metodo che esegue energizzazione e ricezione sulla stessa superficie, il suolo, mentre

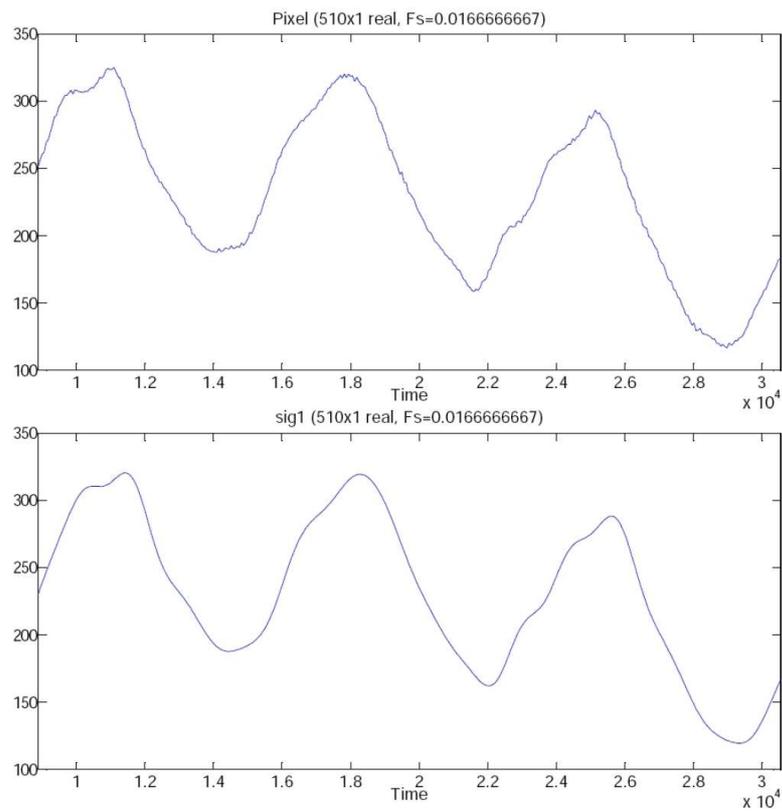


Figura 7.14: Il filtraggio in frequenza, prima (sopra) e dopo (sotto). In ascisse secondi, in ordinata segnale grezzo di temperatura dopo elaborazione.

nel nostro caso si è preferito, avendone la possibilità, operare per trasparenza quindi con sorgente dell'onda su un lato e ricezione della stessa sul lato opposto.

La modalità di indagine messa a punto nel presente studio prevede anch'essa la misura dei tempi di volo. Tuttavia mentre nella sismica si utilizza comunemente un'energizzazione di tipo impulsivo, in cui è immediata la lettura dei tempi nella traccia sismica, per lo studio in esame si è preferito ricorrere, per l'energizzazione, ad un'onda termica periodica, in cui la misura dei tempi non è altrettanto semplice. Per realizzare tale misura si è fatto ricorso alla crosscorrelazione: individuato il pixel della sequenza dei termogrammi a cui corrisponde un punto sulla superficie inquadrata avente distanza minima dalla sorgente, si è operata una cross correlazione fra il punto considerato e gli altri pixel della sequenza. Trattandosi di una funzione periodica anche la cross correlazione avrà un andamento periodico, tuttavia il primo massimo della crosscorrelazione presenterà da pixel a pixel, e quindi da punto a punto, un ritardo corrispondente al ritardo di propagazione dell'onda termica. L'individuazione del tempo corrispondente al primo massimo di crosscorrelazione fornisce quindi la differenza di tempo di volo rispetto al punto di riferimento.

Per agevolare l'interpretazione dei risultati piuttosto che operare sull'intera immagine si è preferito considerare profili lineari e interpretarli operando sulla sezione corrispondente al profilo considerato. Il software consente di definire il punto iniziale e finale del profilo, quindi individua sulla linea congiungente un certo numero di pixel dai quali estrae la cross-correlazione precedentemente calcolata e traccia il grafico corrispondente.

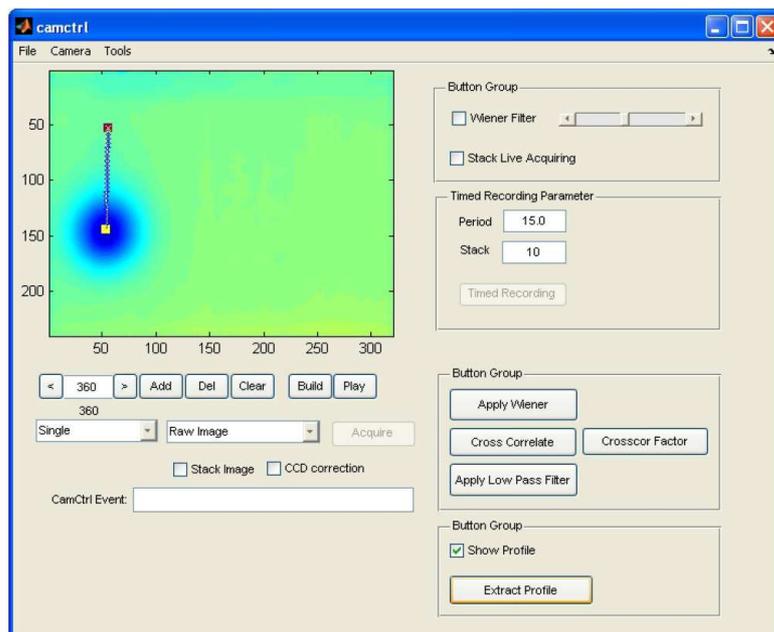


Figura 7.15: Individuazione di un profilo con indicazione dei pixel di cui sarà estratta l'informazione.

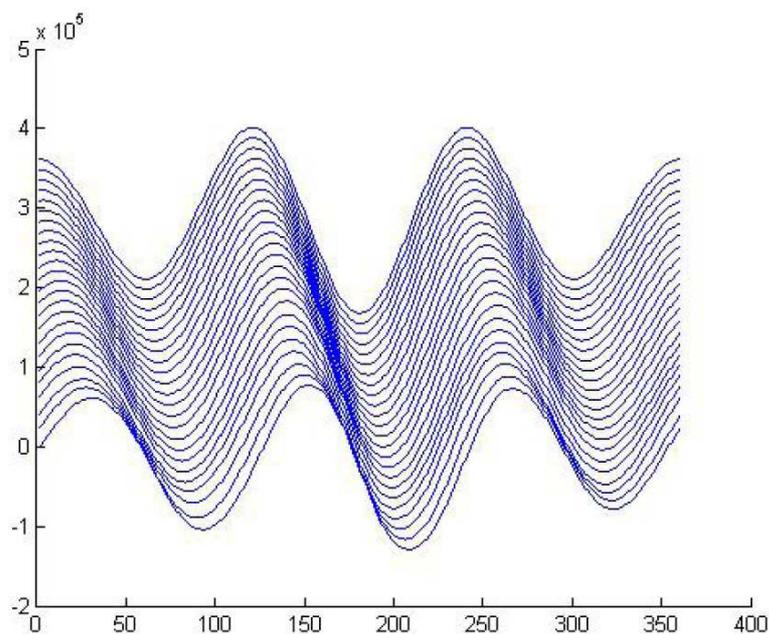


Figura 7.16: Tracce di cross correlazione lungo il profilo individuato nel software. In ascissa distanza in pixel, in ordinata fattore di crosscorrelazione

7.4 L'interpretazione

E' tutt'oggi vivo il dibattito della comunità scientifica circa la possibilità di analizzare il comportamento delle onde diffusive in genere, e termiche nello specifico, secondo un approccio analogo a quello delle onde di tipo meccanico. Esistono sicuramente delle significative differenze e delle difficoltà a livello di impostazione teorica, tuttavia diversi lavori hanno confermato una buona corrispondenza fra i dati sperimentali e i valori calcolati secondo tale semplificazione. Per l'interpretazione dei risultati del presente lavoro si è scelto di utilizzare questo approccio, tanto più che l'esperimento è incentrato sul parallelismo tra i metodi termici e i metodi sismici e risulta quindi spontaneo sostenere l'analogia tra le onde termiche e le onde sismiche nel momento in cui i dati sperimentali confermano la bontà dell'impostazione, lasciando quindi concludere che l'errore che si commette semplificando la modellazione risulta compreso entro gli errori di misura.

Supponendo una propagazione di tipo ottico dell'onda termica la propagazione all'interno del materiale è governata dalla legge di Snell. E' stato quindi studiato il tempo di arrivo per diverse alternanze di strati.

7.4.1 Modello a 2 strati

In questo caso il tempo di percorrenza dell'onda è governato dalla legge di Snell:

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (7.4)$$

$$h_1 \tan\theta_1 + h_2 \tan\theta_2 = x \quad (7.5)$$

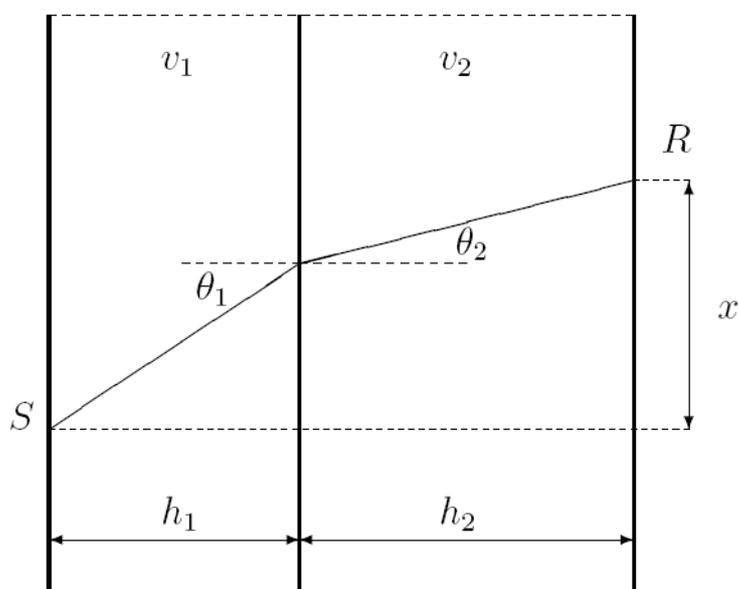


Figura 7.17: Sistema di riferimento del termogramma grezzo da vincoli di natura geometrica

e da:

$$t = \frac{h_1}{v_1 \cos \theta_1} + \frac{h_2}{v_2 \cos \theta_2} \quad (7.6)$$

7.4.2 Modello a 3 strati

In questo caso il tempo di percorrenza dell'onda è governato dalla legge di Snell:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (7.7)$$

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_3} = \frac{v_2}{v_3} \quad (7.8)$$

da vincoli di natura geometrica:

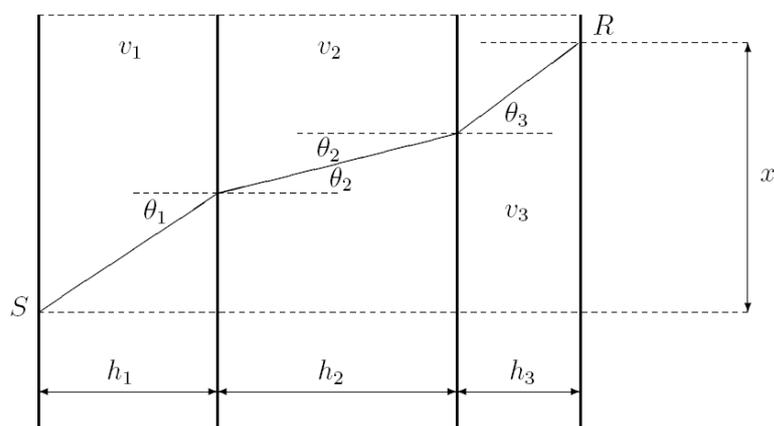


Figura 7.18: Sistema di riferimento del termogramma grezzo

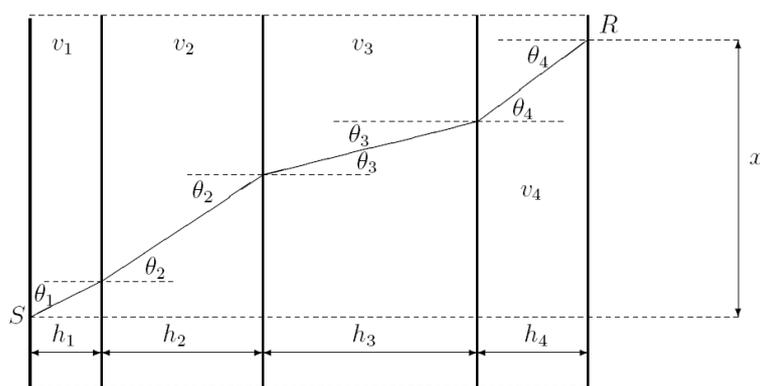


Figura 7.19: Sistema di riferimento del termogramma grezzo

$$h_1 \tan \theta_1 + h_2 \tan \theta_2 + h_3 \tan \theta_3 = x \quad (7.9)$$

e da:

$$t = \frac{h_1}{v_1 \cos \theta_1} + \frac{h_2}{v_2 \cos \theta_2} + \frac{h_3}{v_3 \cos \theta_3} \quad (7.10)$$

7.4.3 Modello a 4 strati

In questo caso il tempo di percorrenza dell'onda è governato dalla legge di Snell:

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (7.11)$$

$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_3} = \frac{v_2}{v_3} \quad (7.12)$$

$$\frac{\sin\theta_3}{\sin\theta_4} = \frac{v_3}{v_4} \quad (7.13)$$

$$h_1 \tan\theta_1 + h_2 \tan\theta_2 + h_3 \tan\theta_3 + h_4 \tan\theta_4 = x \quad (7.14)$$

e da:

$$t = \frac{h_1}{v_1 \cos\theta_1} + \frac{h_2}{v_2 \cos\theta_2} + \frac{h_3}{v_3 \cos\theta_3} + \frac{h_4}{v_4 \cos\theta_4} \quad (7.15)$$

7.4.4 Il software di modellazione

Il software di modellazione messo a punto consente di valutare la variazione dei tempi di arrivo dell'onda termica al variare dell'offset sorgente-ricevitore disposti su due facce opposte di un eventuale mezzo da investigare. Modificando i parametri secondo uno schema trial and error è possibile individuare i valori degli spessori e delle velocità di propagazione della fase dell'onda termica negli strati, fino ad ottenere la corrispondenza con i dati ottenuti attraverso la misura del ritardo del picco di cross correlazione lungo il profilo individuato. La velocità di propagazione dell'onda termica è legato alla diffu-

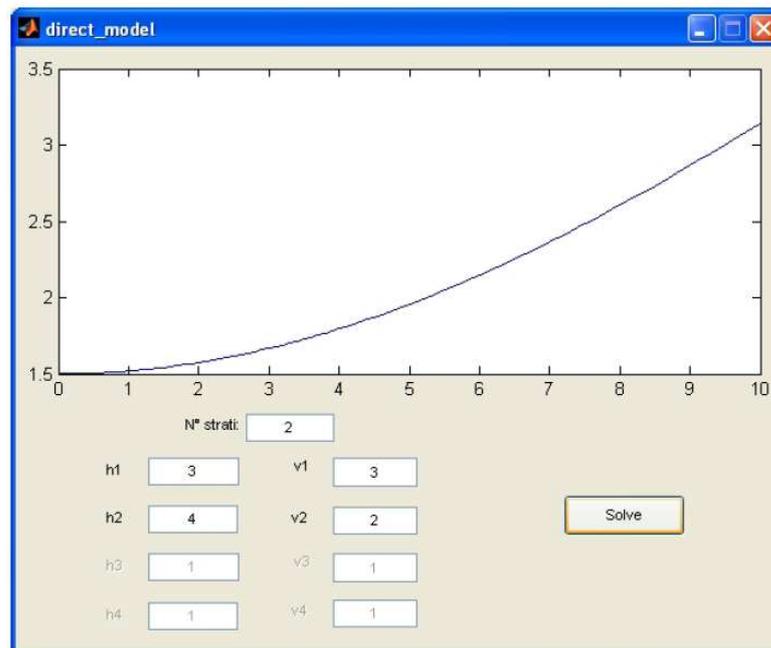


Figura 7.20: Sistema di riferimento del termogramma grezzo

sività termica dalle relazioni espresse secondo uno schema di interpretazione ottica del fenomeno di cui ai paragrafi precedenti.

Capitolo 8

Applicazioni

Il presente lavoro nasce dalla necessità di superare i limiti emersi nello studio dell'analogia termica-elettrica precedente affrontata e quindi valutare la fattibilità dell'utilizzo delle onde termiche secondo un approccio di tipo sismico, individuando quindi le modalità attraverso le quali generare, misurare ed utilizzare le onde termiche per la determinazione dei parametri di interesse termico di un materiale. Il procedere della ricerca, trattandosi di un tema totalmente nuovo, ha richiesto la soluzione di problematiche di natura tecnica ed elaborativa a cui si è data una risposta efficace mostrando la possibilità di utilizzare questo approccio per la misura delle differenze dei tempi di percorrenza di un'onda termica in materiali altamente isolanti e spessori significativi. La metodica messa a punto evidenzia la possibilità di ricavare la velocità di propagazione di un'onda termica a regime in un materiale e quindi da questa la diffusività termica. Si è trattato di un approccio prevalentemente metodologico che ha fornito comunque risultati concordi con le proprietà termiche dei materiali utilizzati nel modello.

8.1 Dati grezzi esperimento

Le immagini incluse nel presente capitolo costituiscono l'acquisizione eseguita con energizzazione su un lato del pannello composto polistirene-lana di roccia. Il dato non ha subito elaborazione alcuna e le scale di colori sono state scelte in modo da esaltare la dinamica dell'immagine senza alterare il segno dell'escursione di temperatura. Le differenti immagini si susseguono in ordine temporale a distanza di un minuto l'una dall'altra per complessive 4 ore e 30 minuti. per evidenziare il fenomeno di propagazione dell'onda termica. Si può facilmente notare la propagazione dell'onda termica che attraversa il complesso dei materiali, mentre non è sufficientemente chiara la propagazione laterale sulla faccia del provino. La scala colori seguenti è stata utilizzata per evidenziare la dinamica nelle immagini registrate grezze e filtrate:

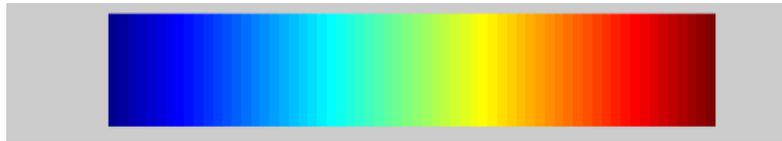
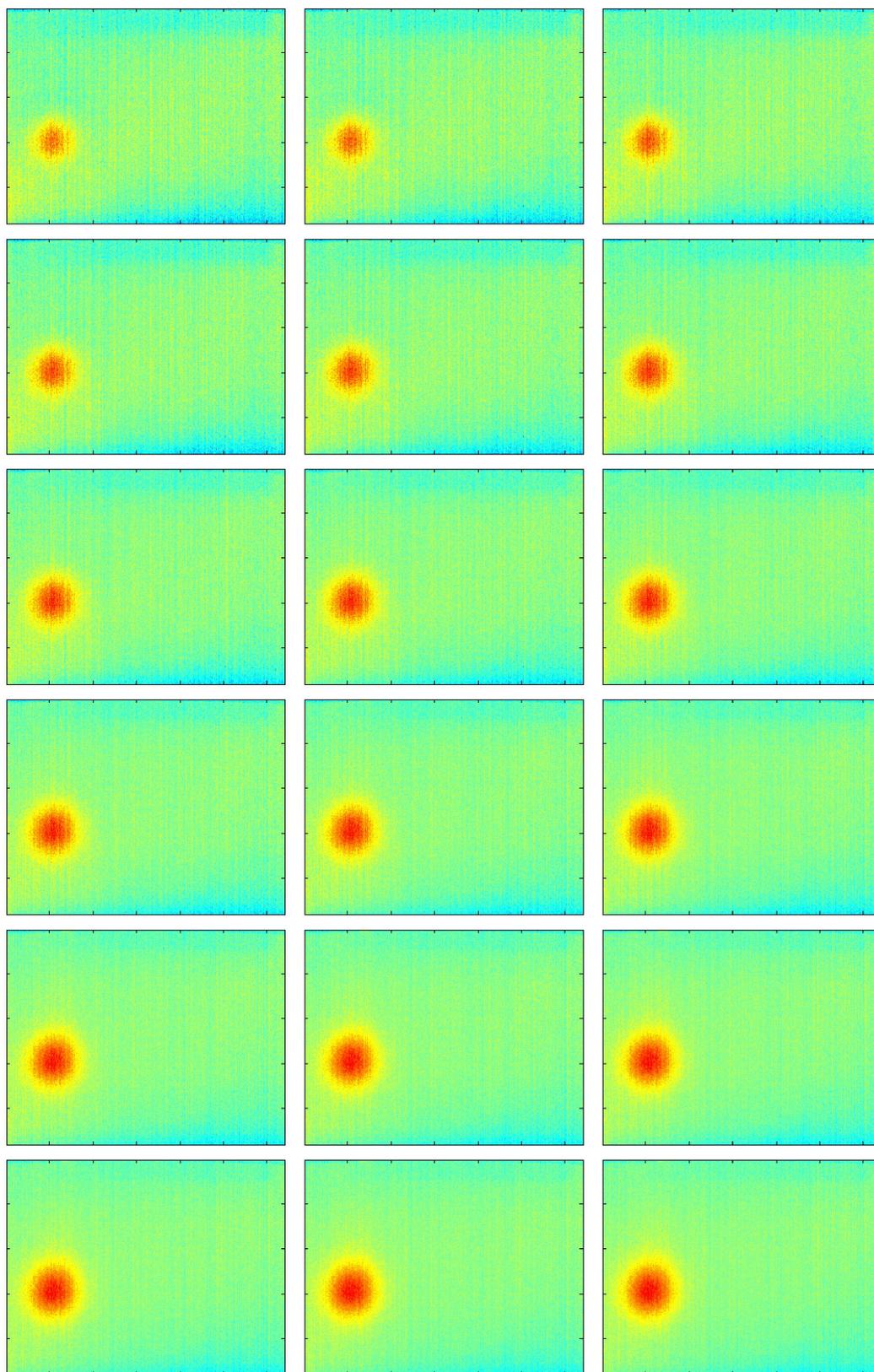
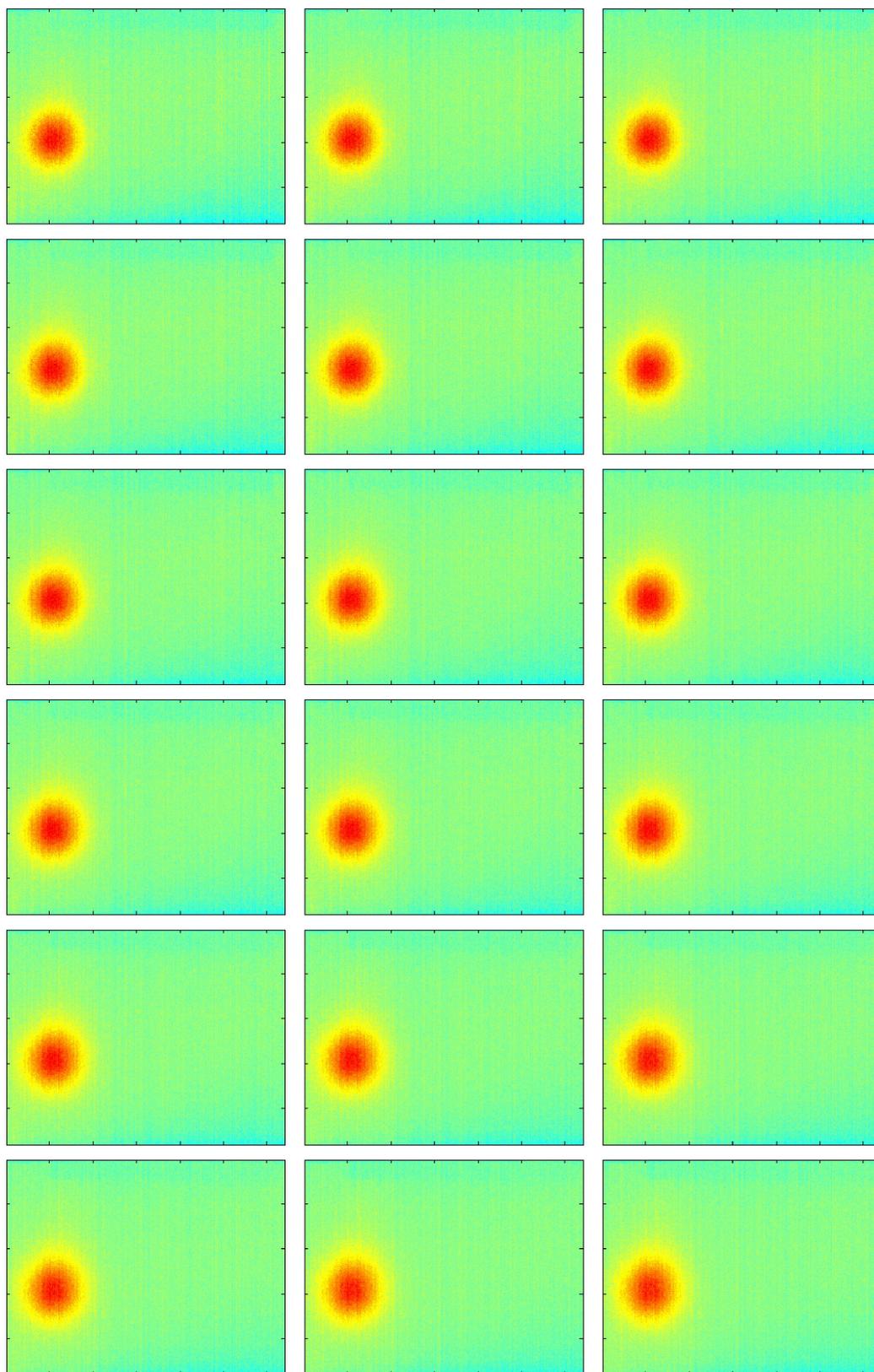
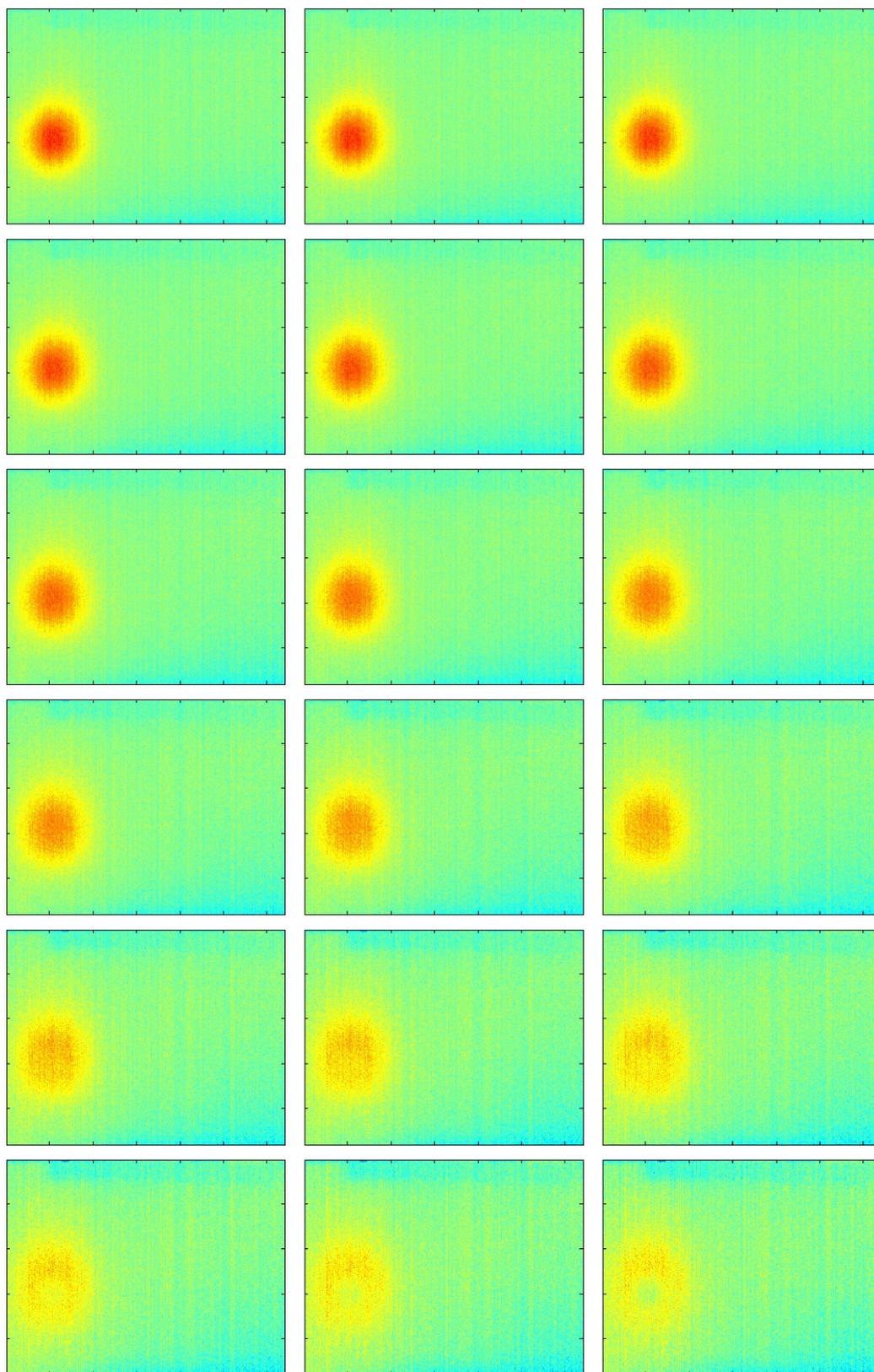
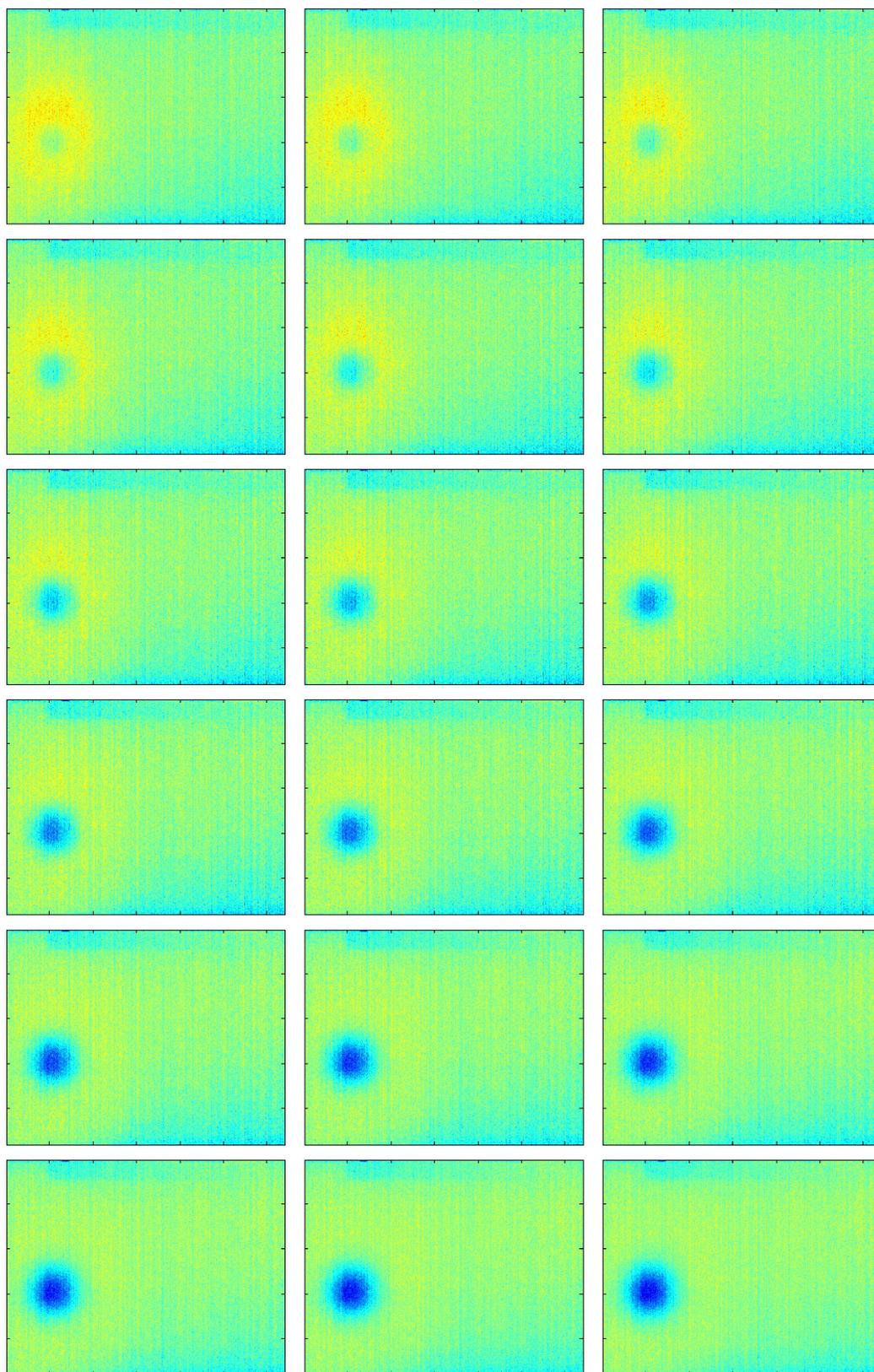


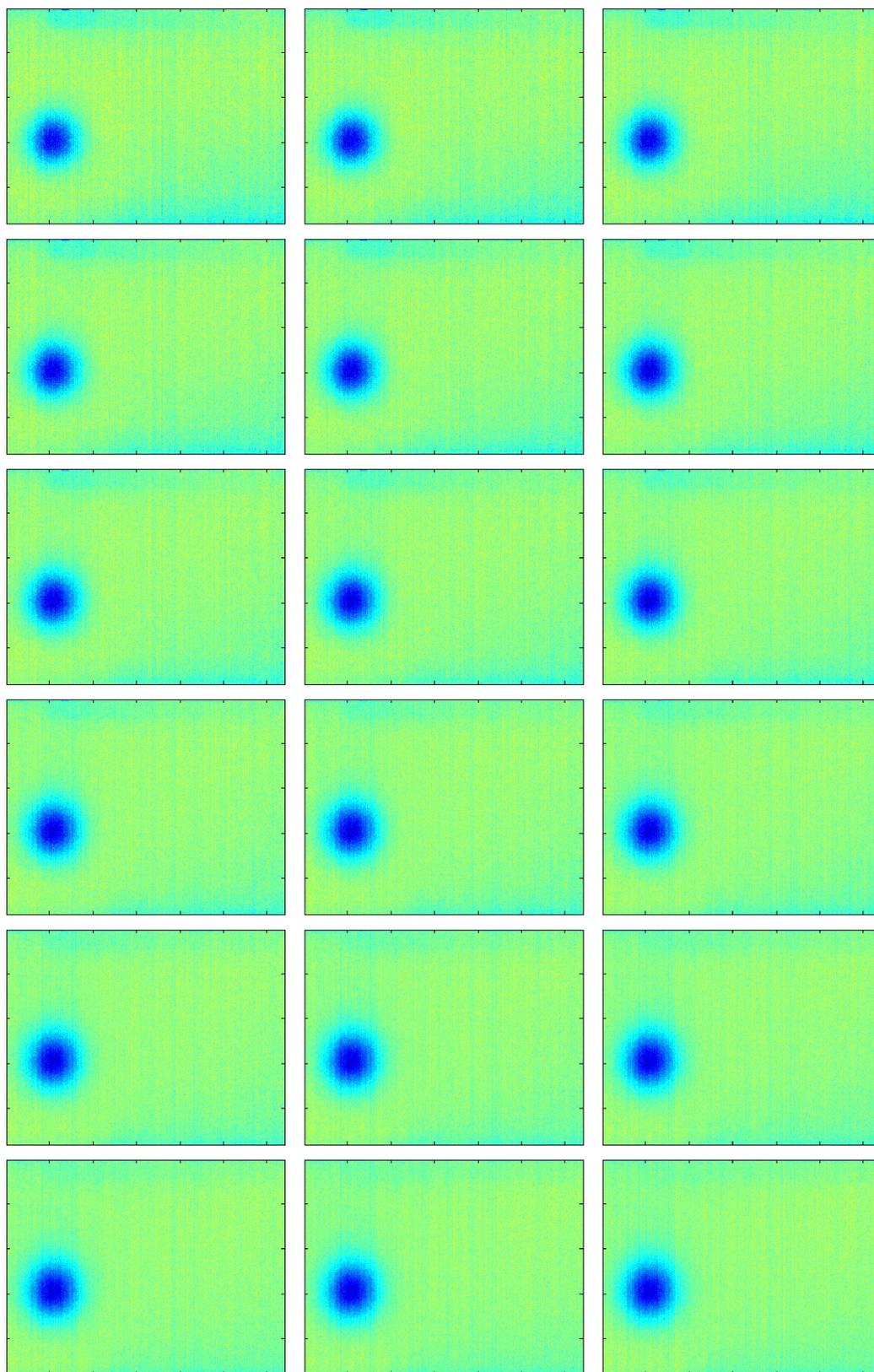
Figura 8.1: Scala di colori utilizzata per la rappresentazione dei termogrammi, dal blu (temperature inferiori) al rosso (temperature superiori)

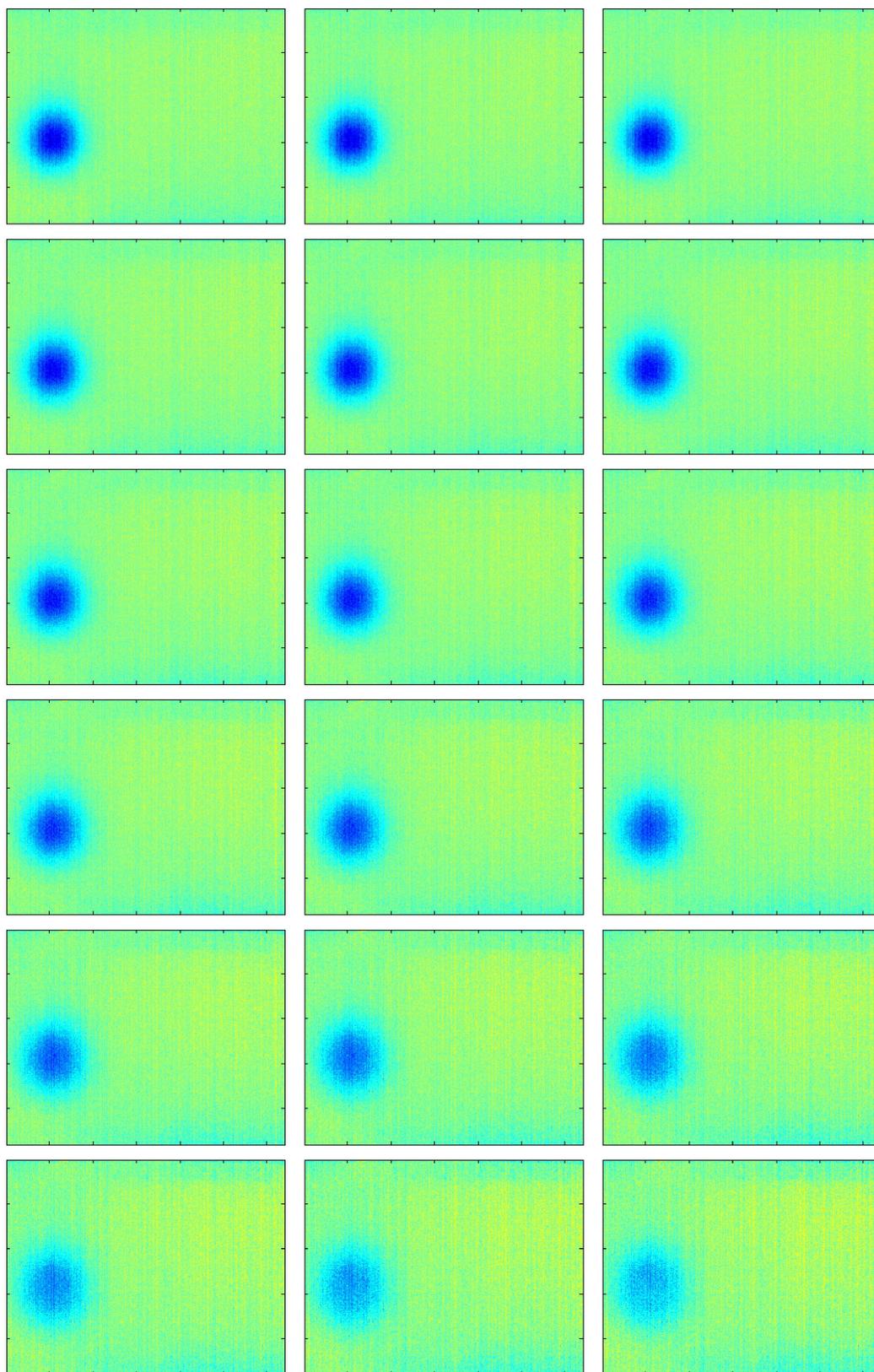


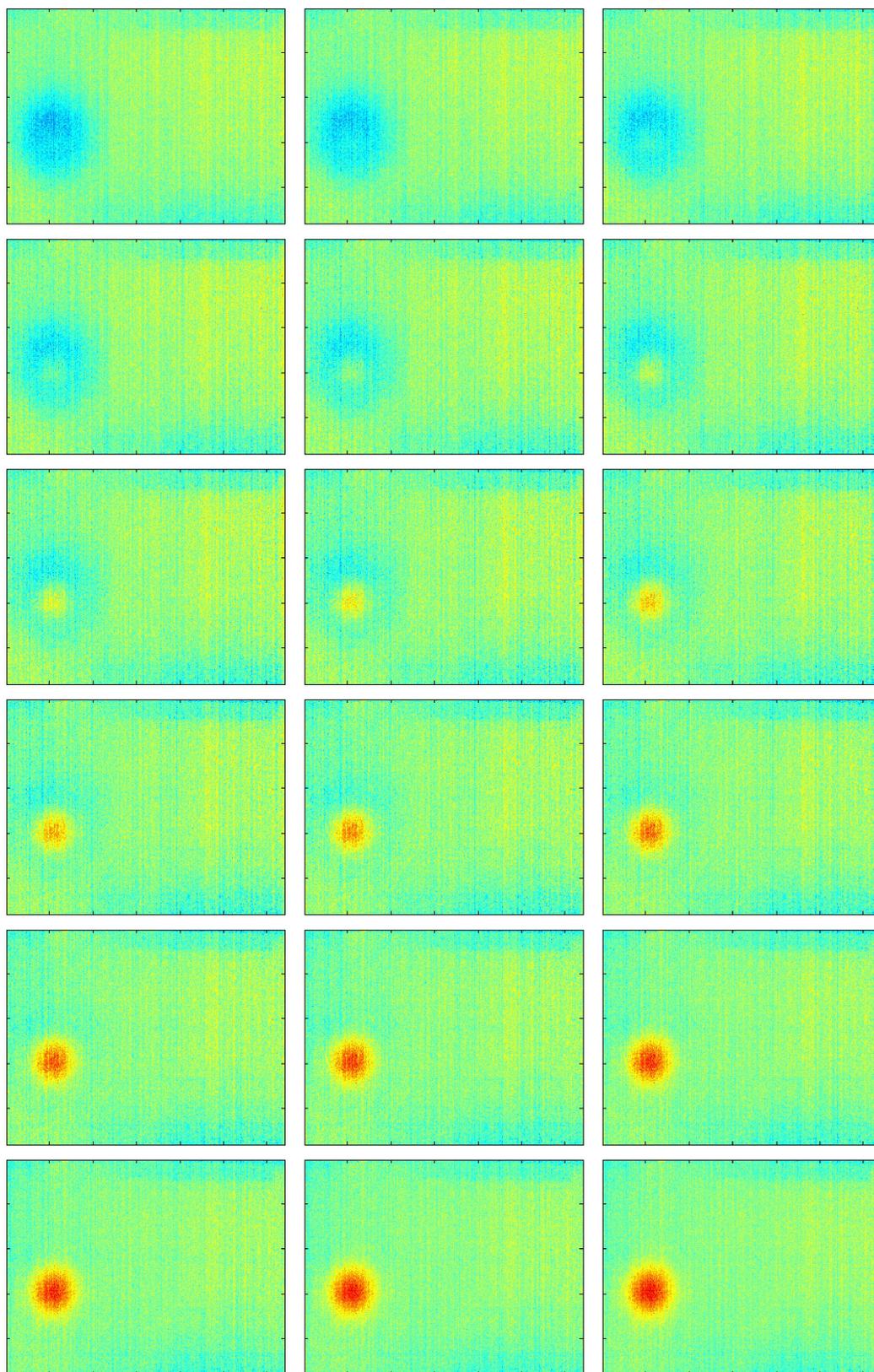


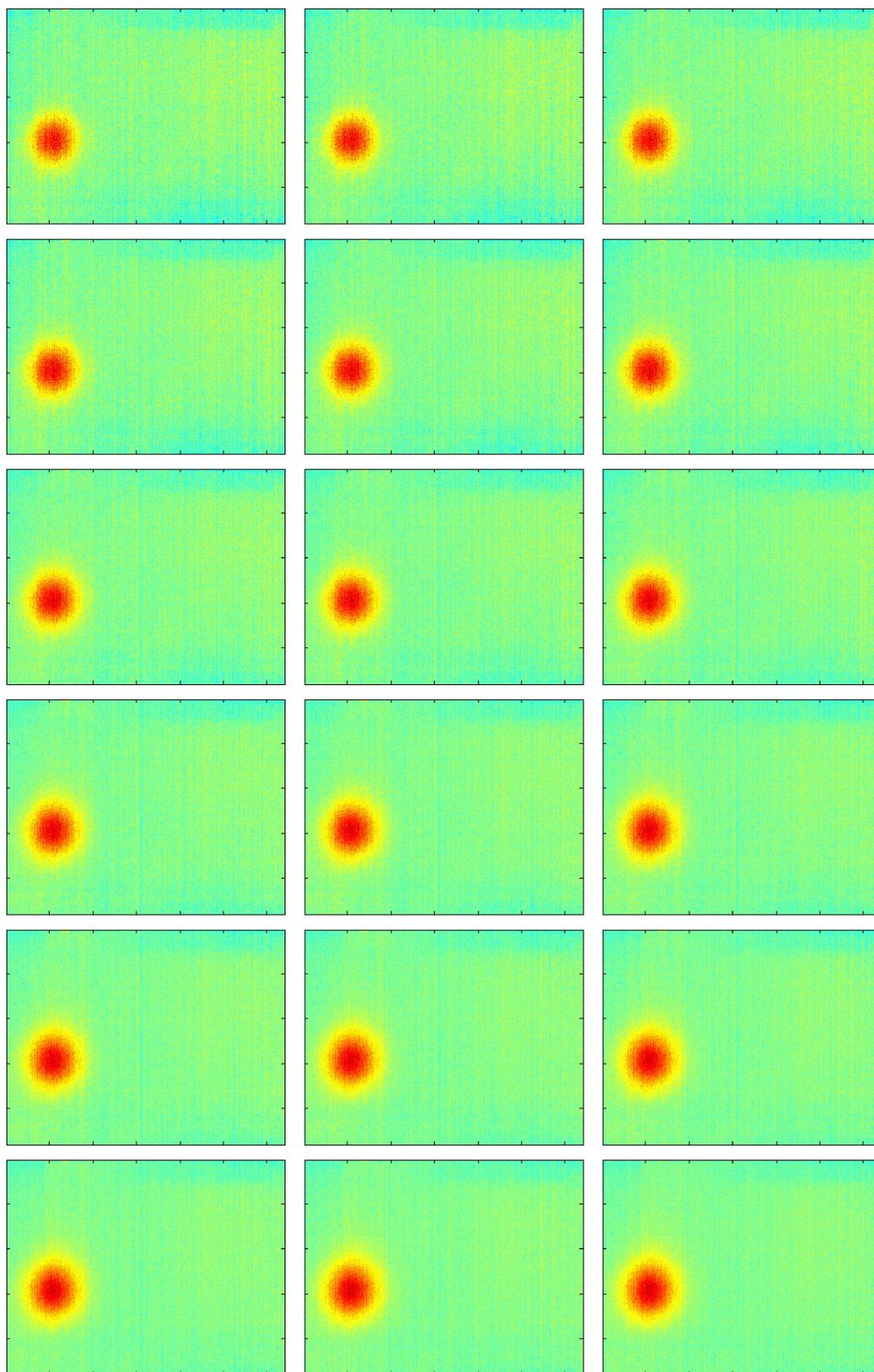


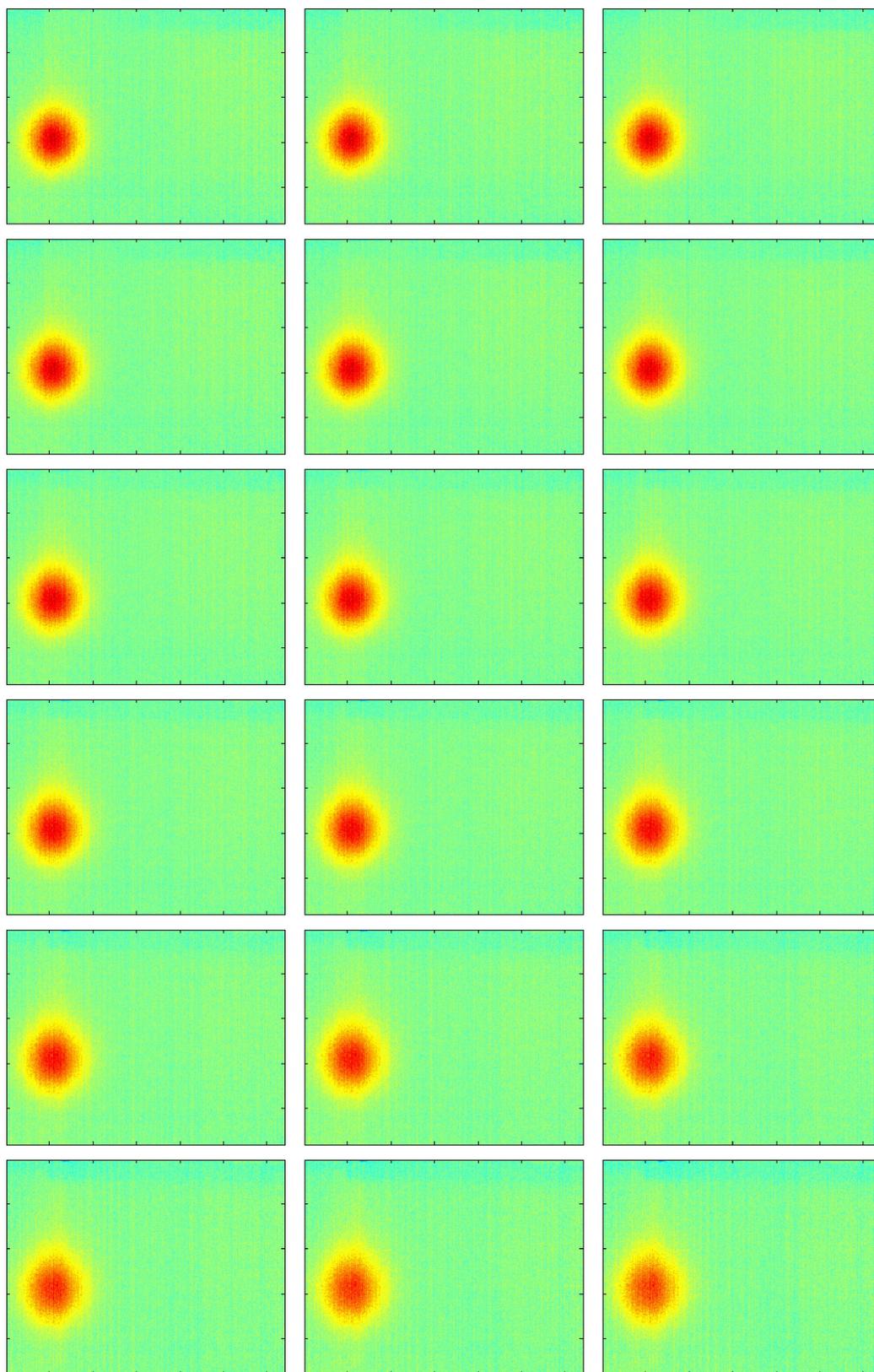


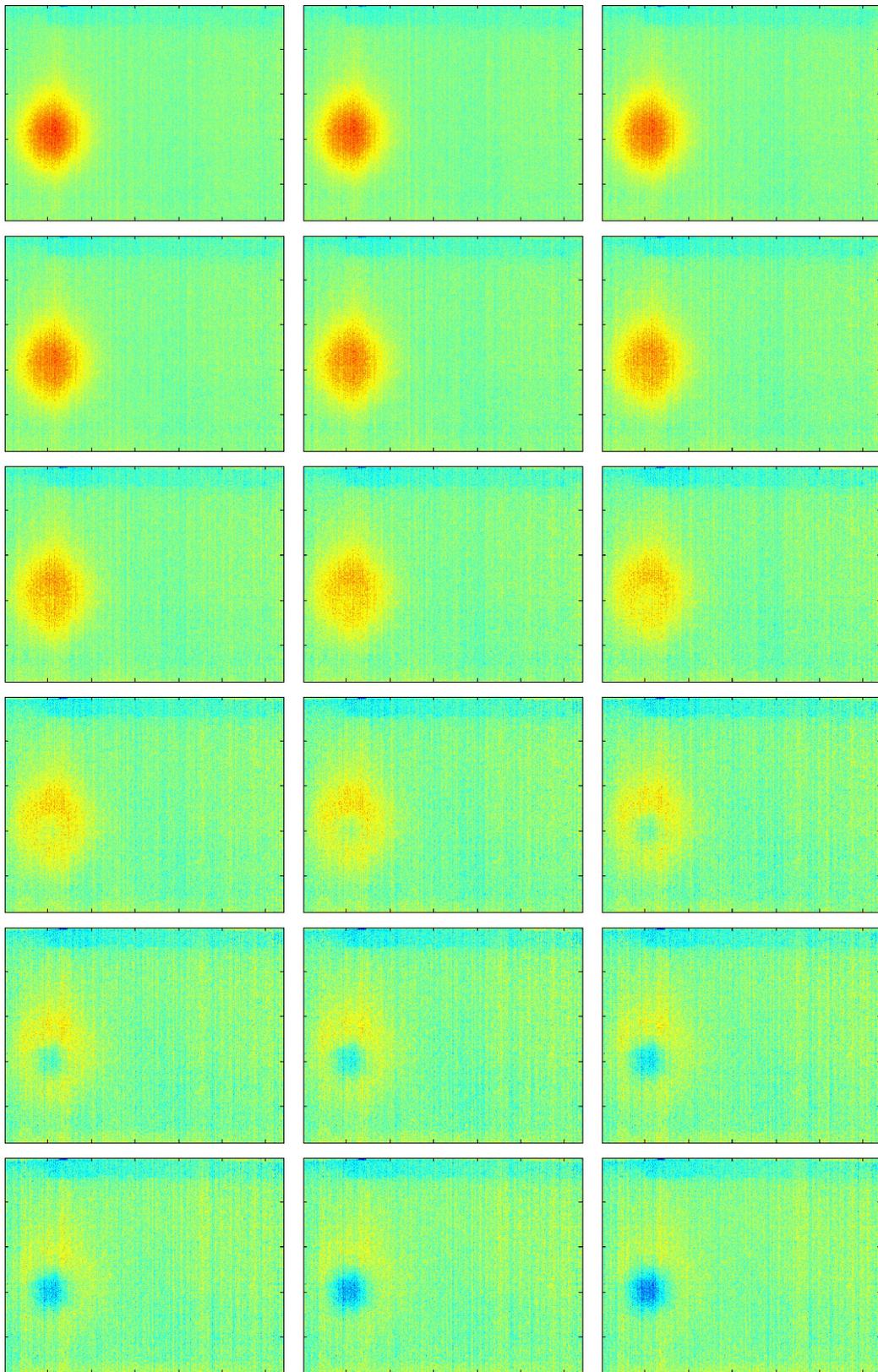


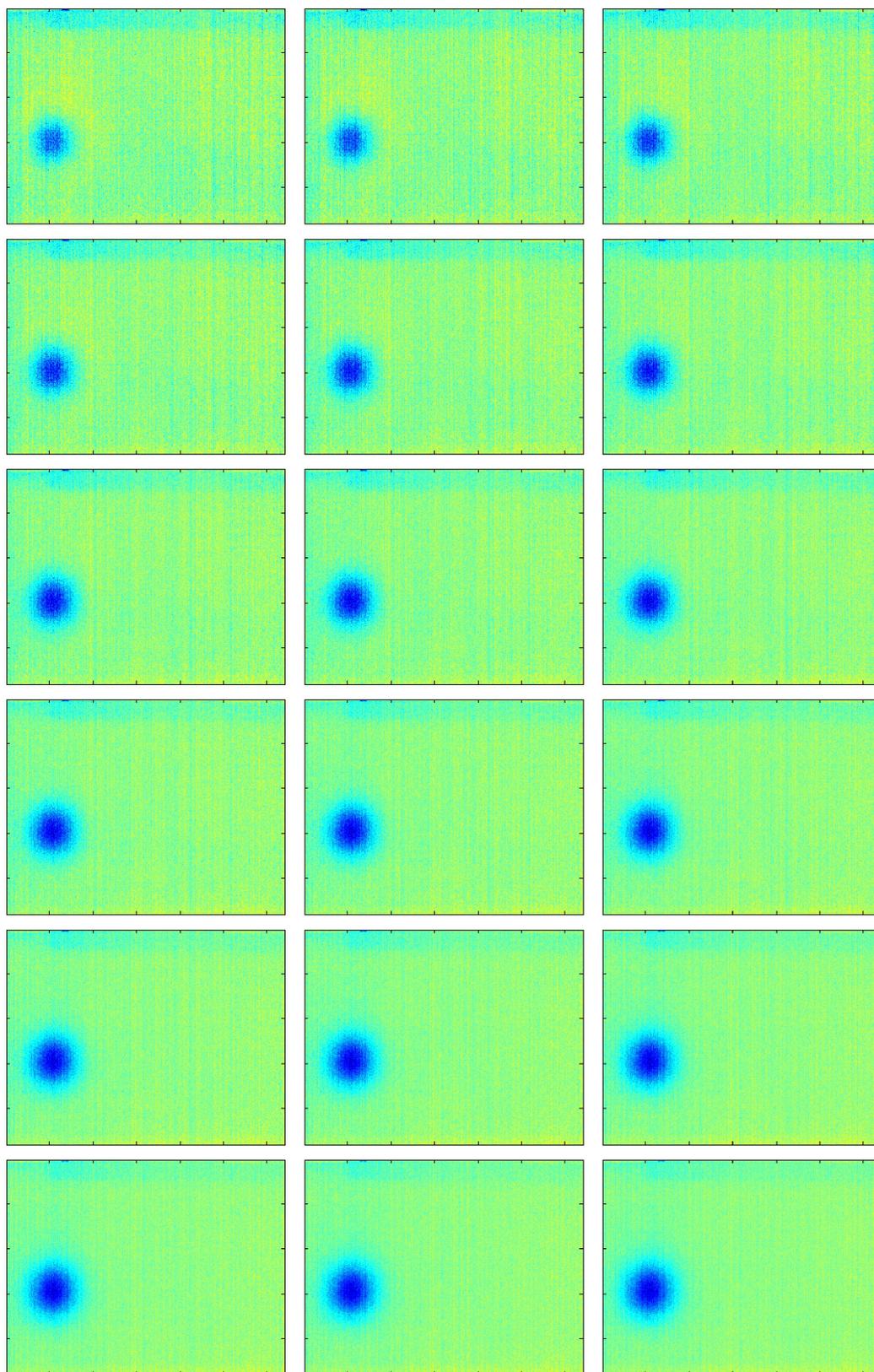


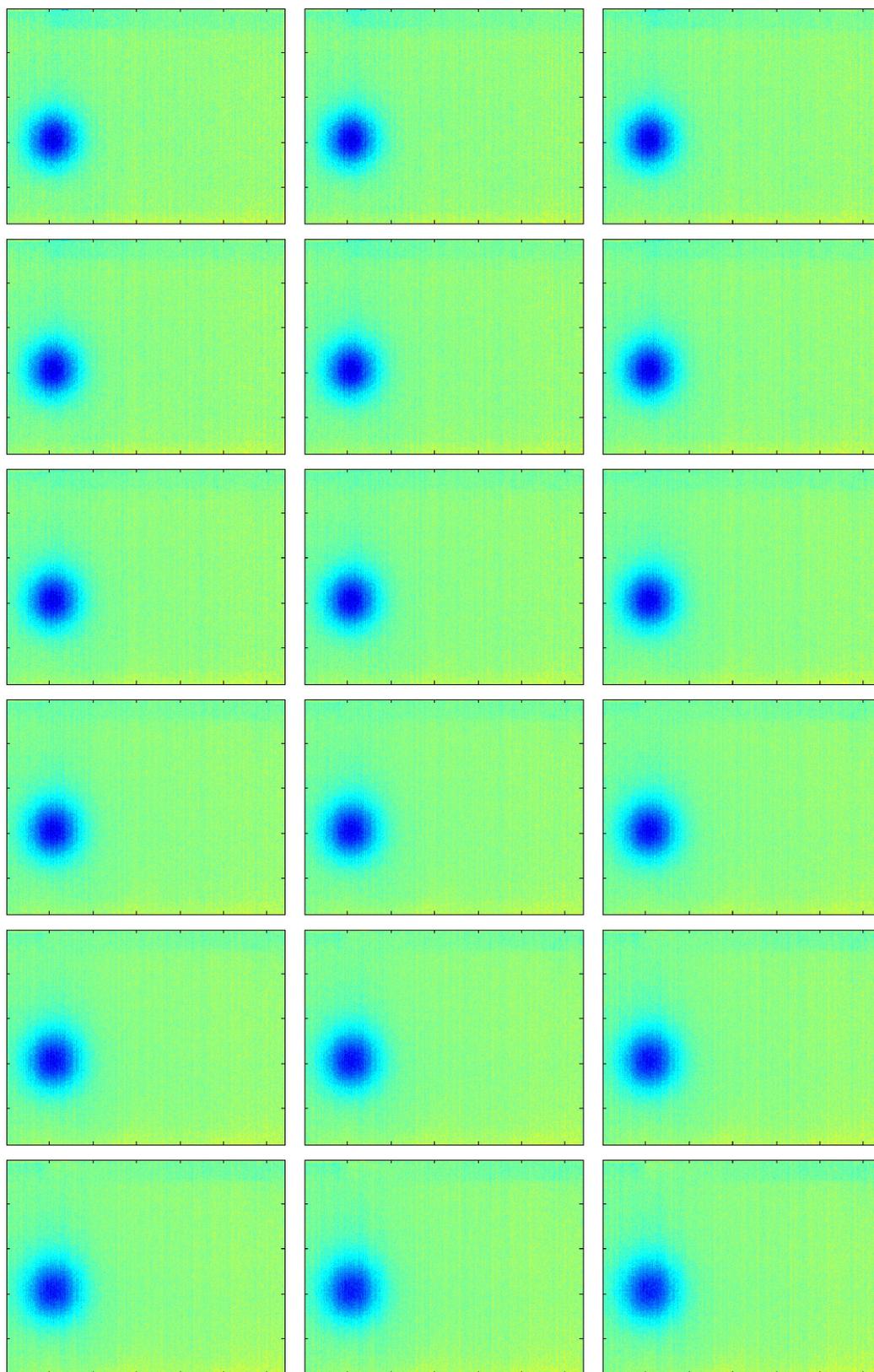


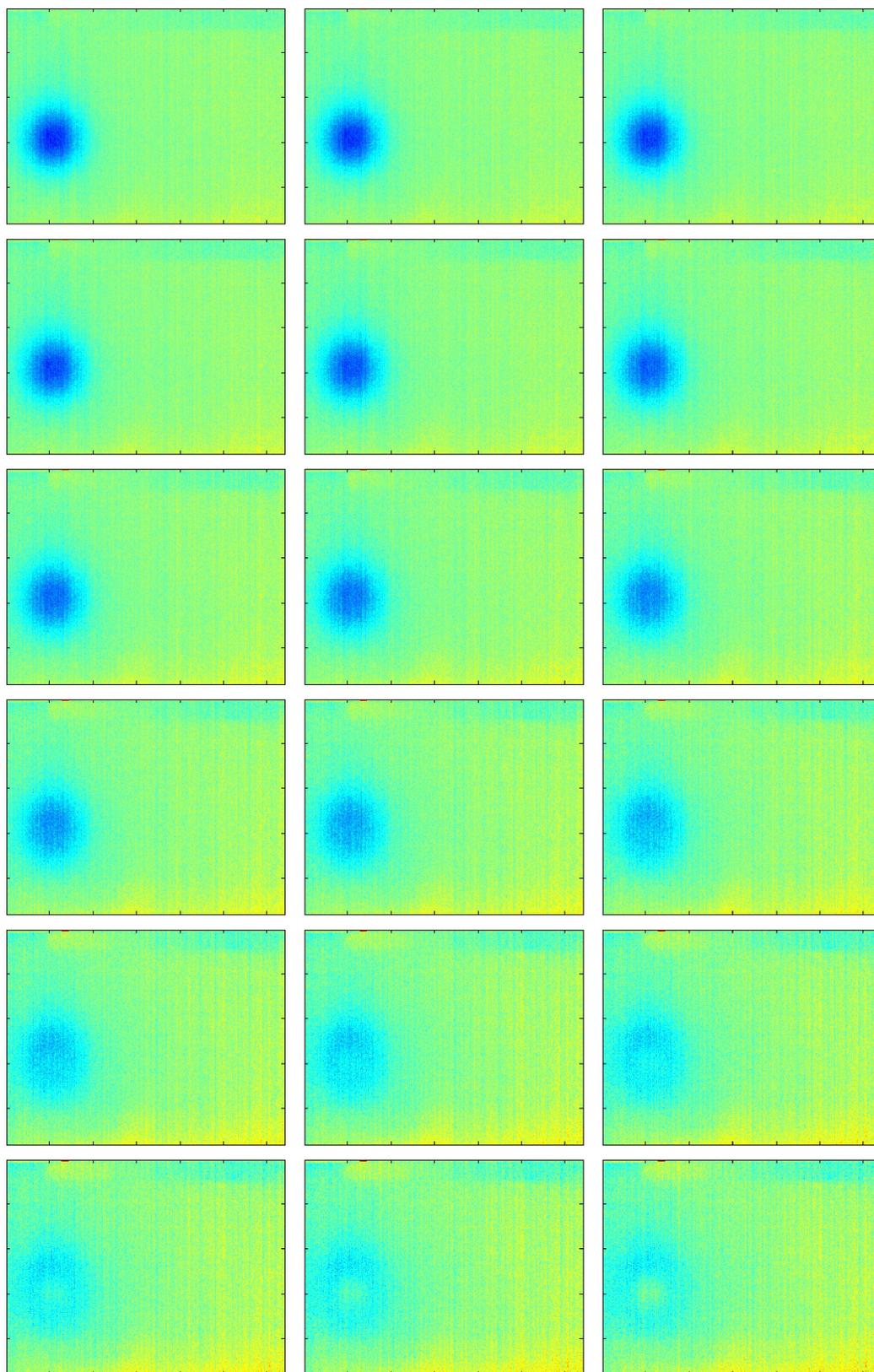


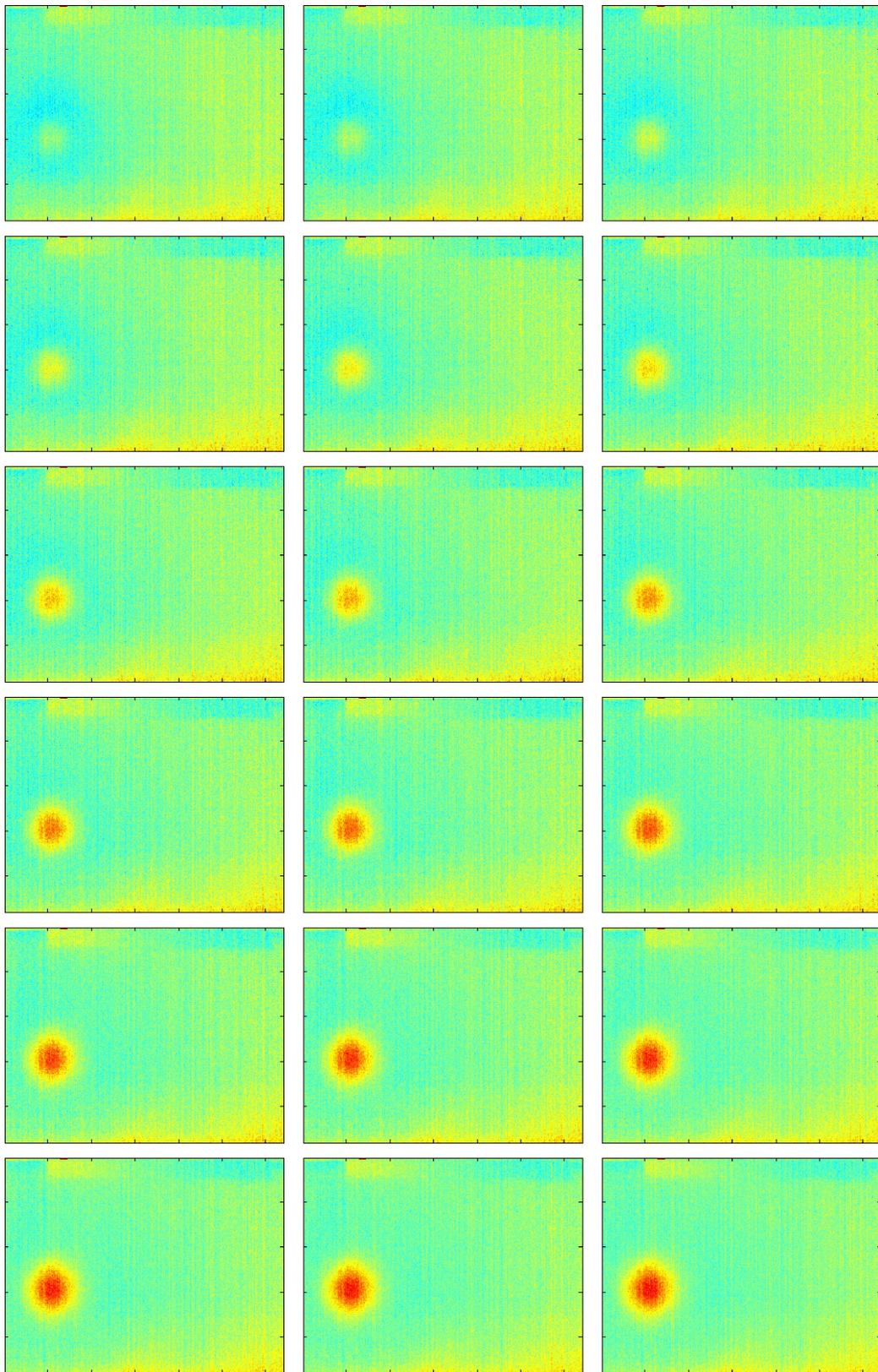


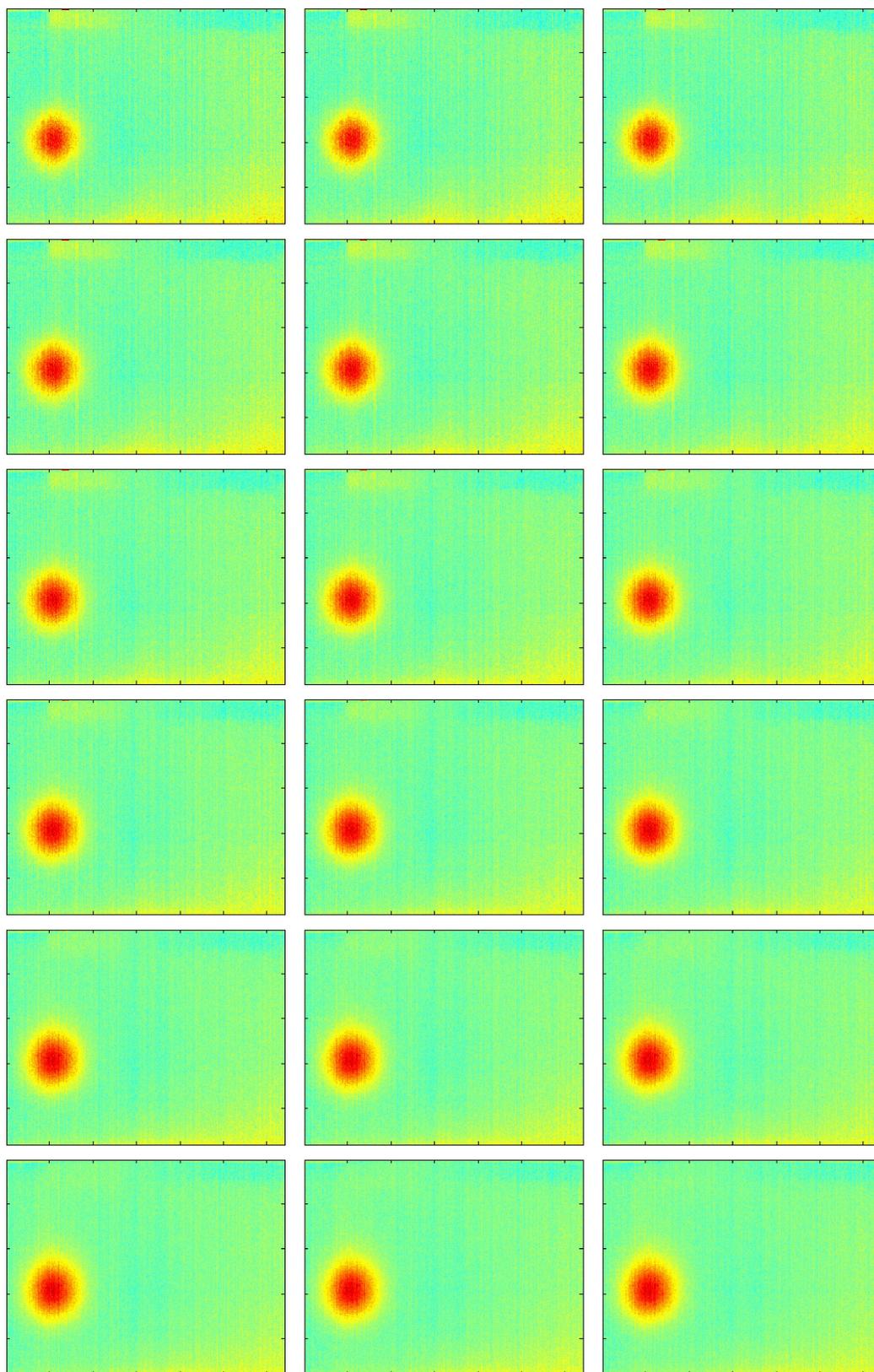






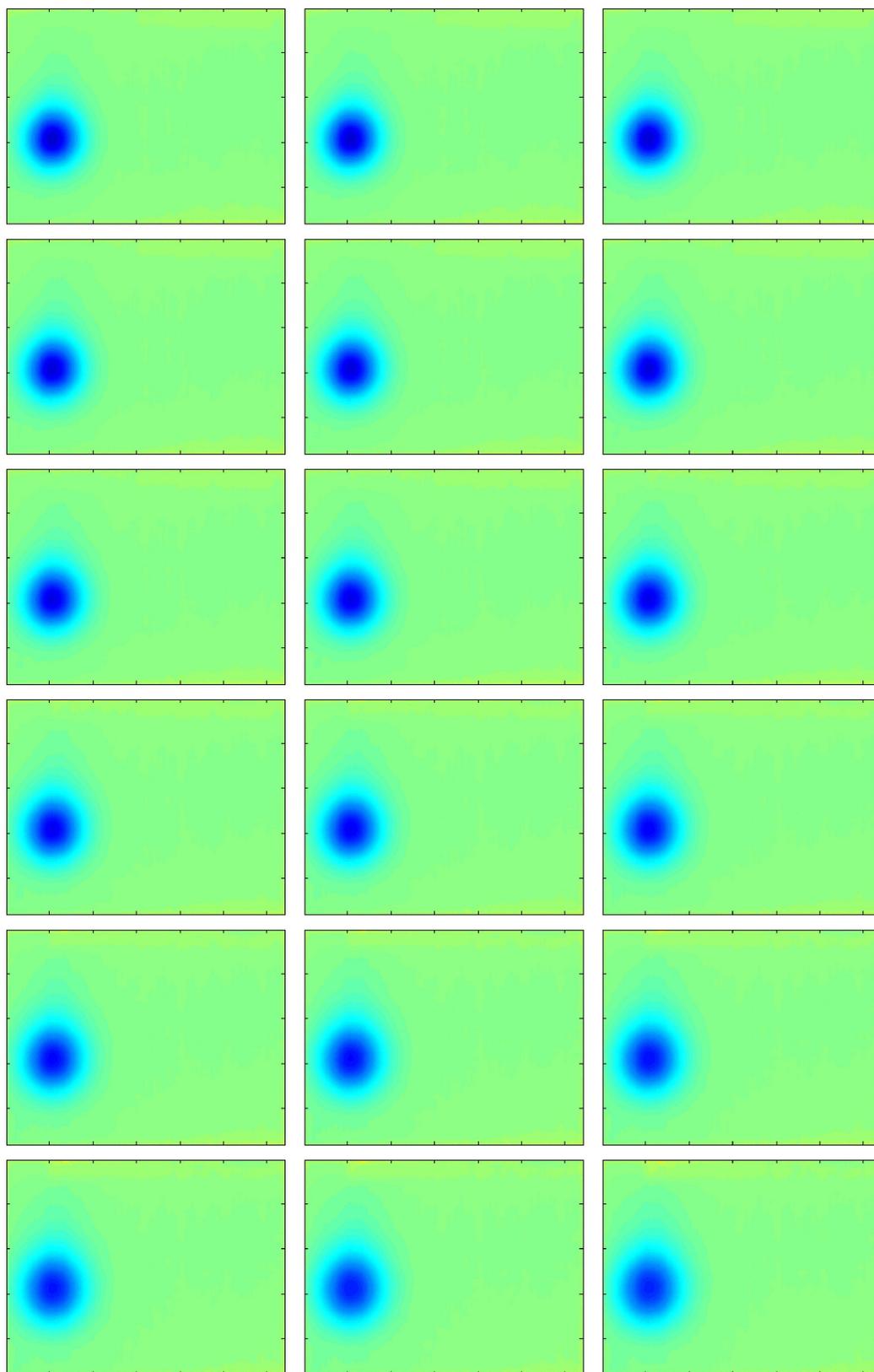


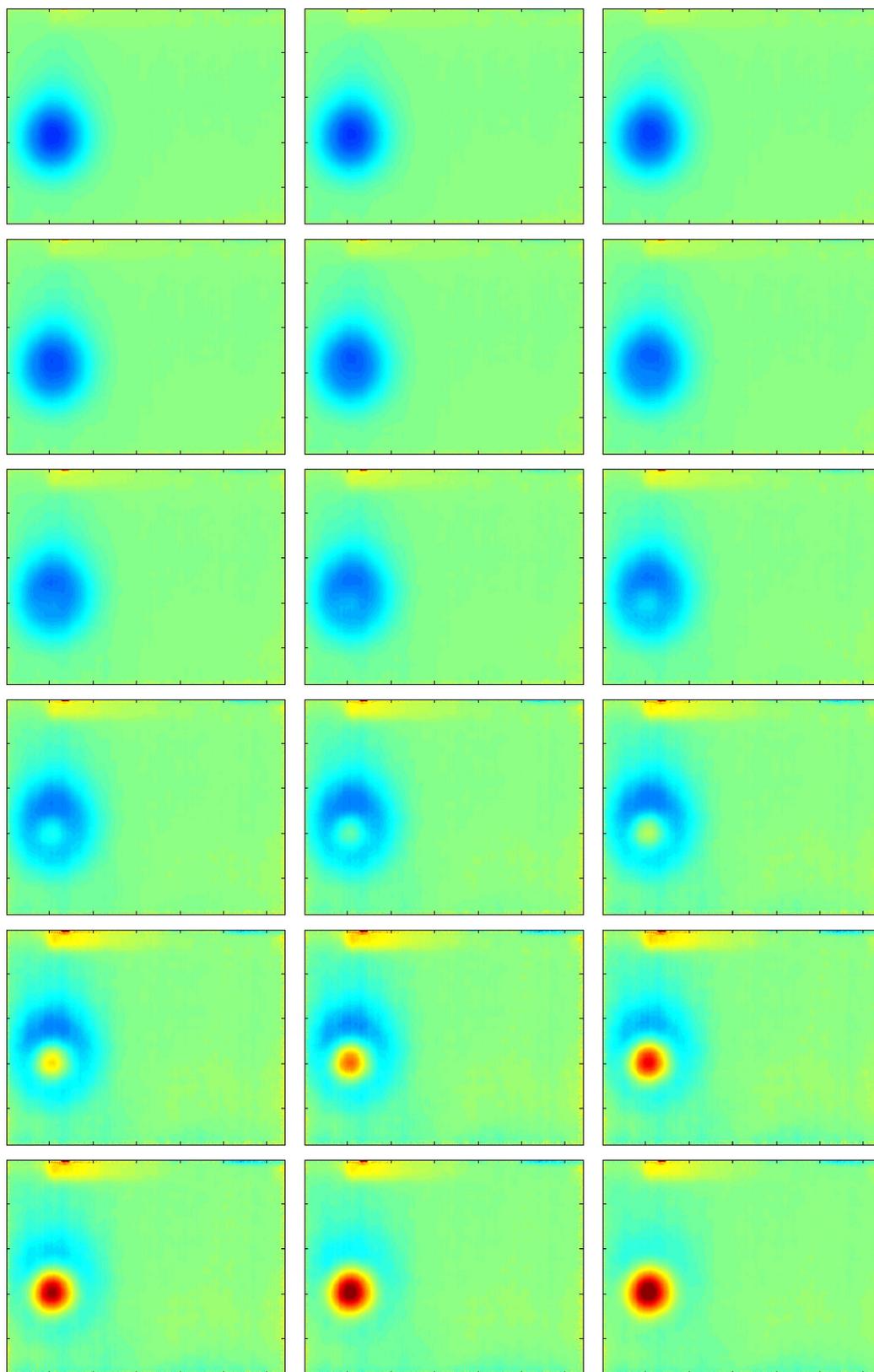


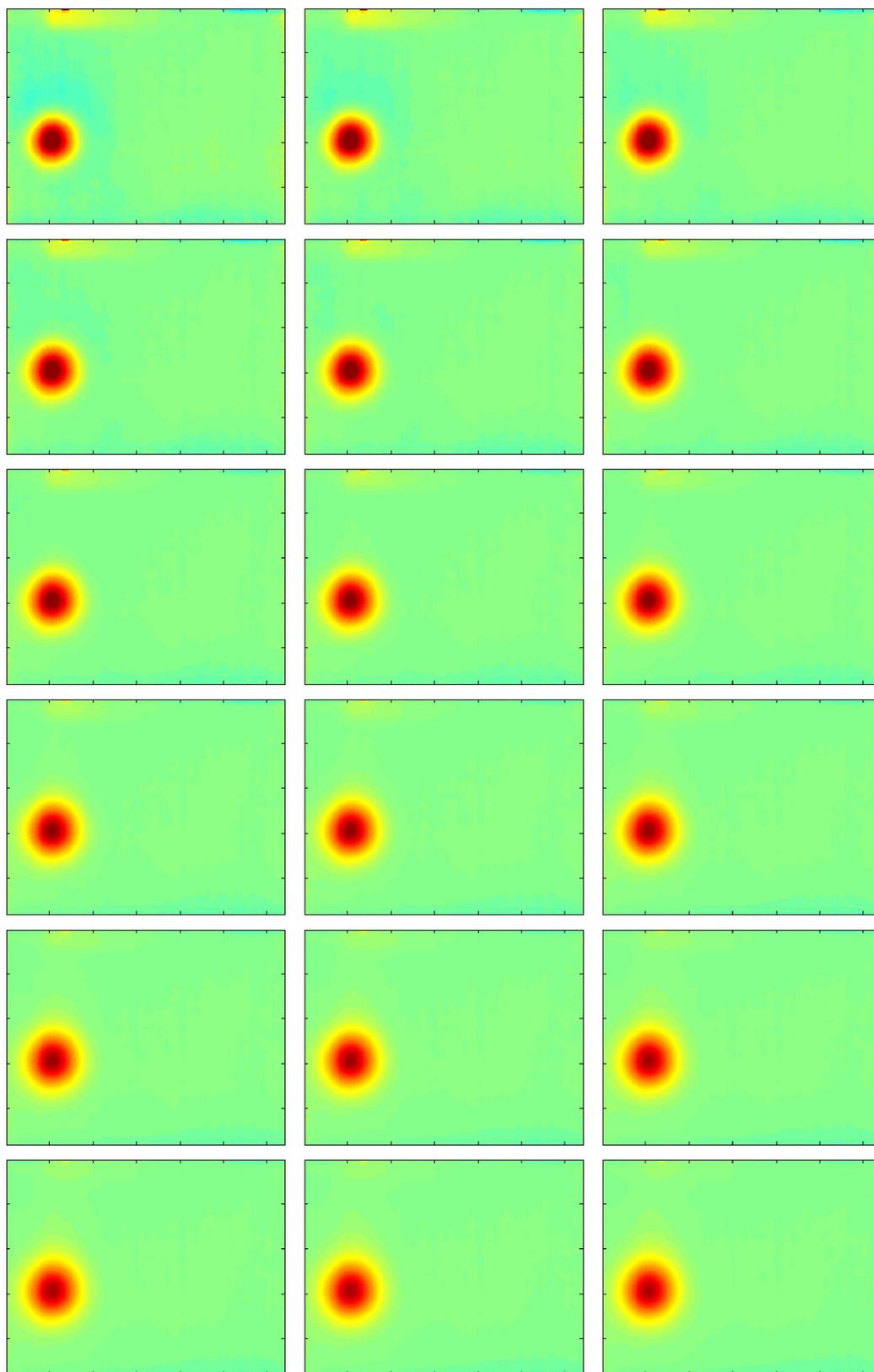


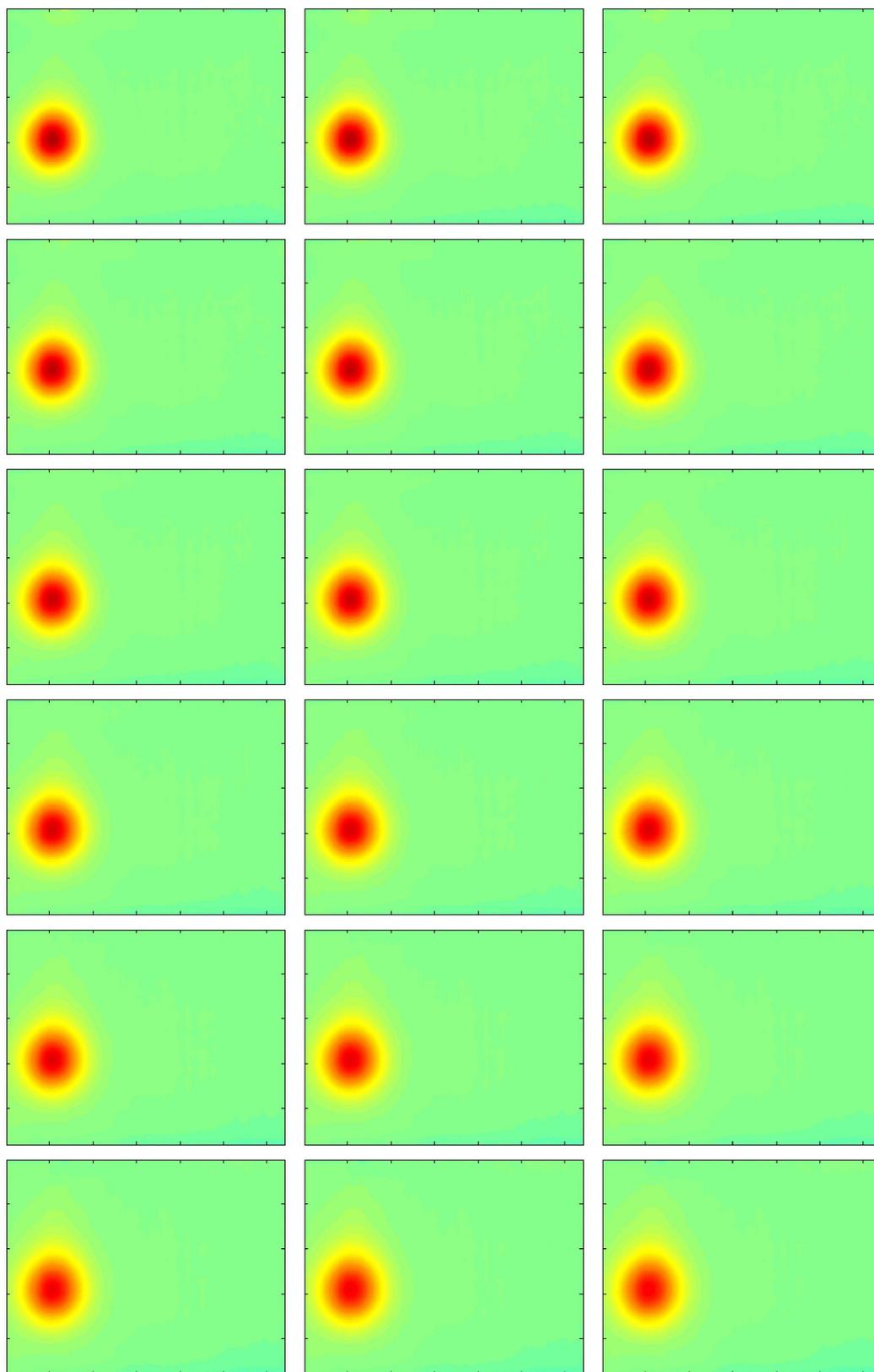
8.2 Dati filtrati esperimento

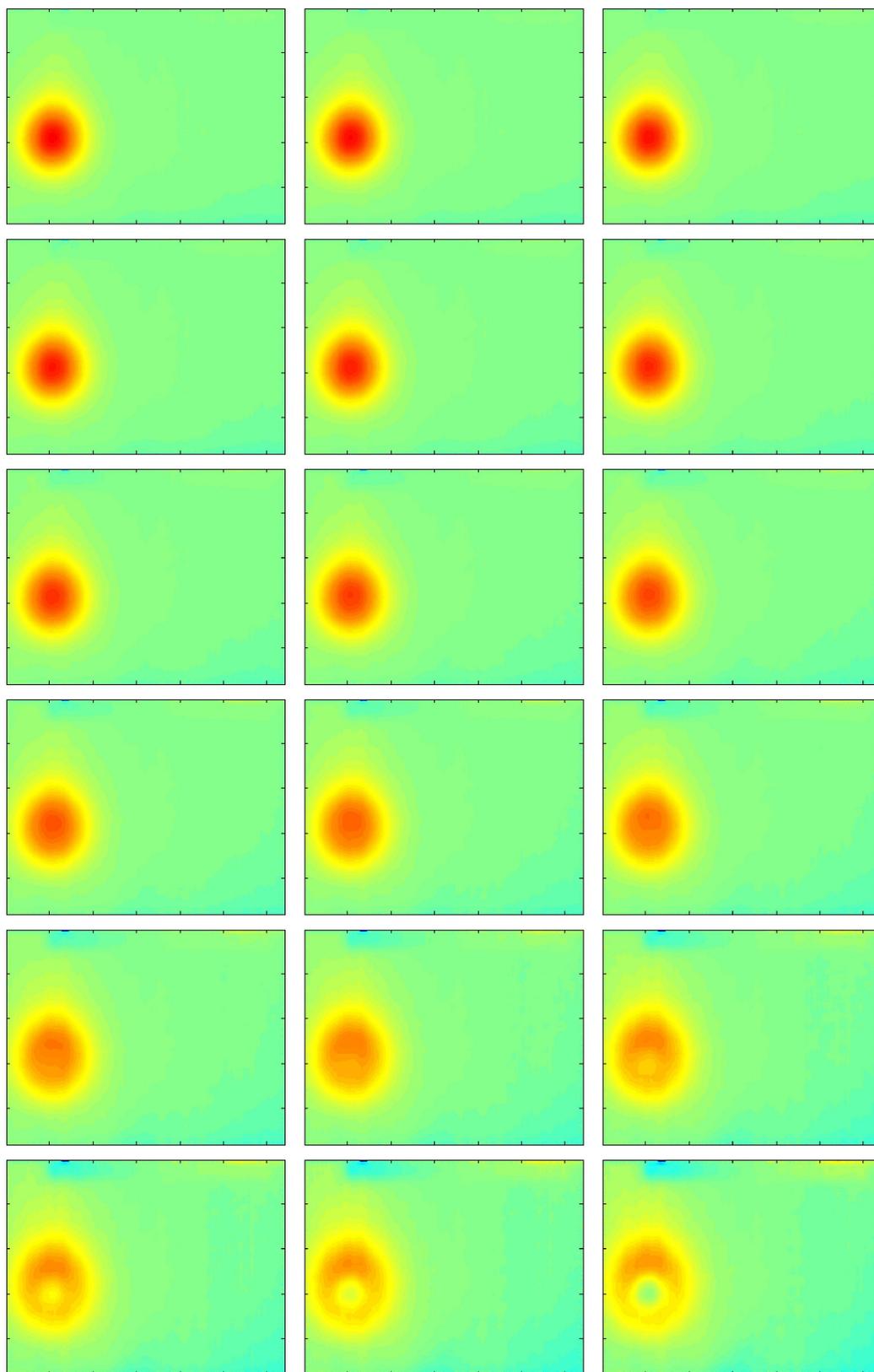
Le immagini incluse nel presente capitolo costituiscono l'acquisizione eseguita con energizzazione su un lato del pannello composto polistirene-lana di roccia. Il dato in questo caso è stato sottoposto a filtraggio spaziale, temporale e crosscorrelazione. Le scale di colori sono state scelte in modo da esaltare la dinamica dell'immagine senza alterare il segno dell'escursione di temperatura. Appare evidente la possibilità di riconoscere e misurare l'avanzamento dell'onda termica anche dove nell'immagine termica grezza era solo intuibile. Le differenti immagini si susseguono in ordine temporale per evidenziare il fenomeno di propagazione.

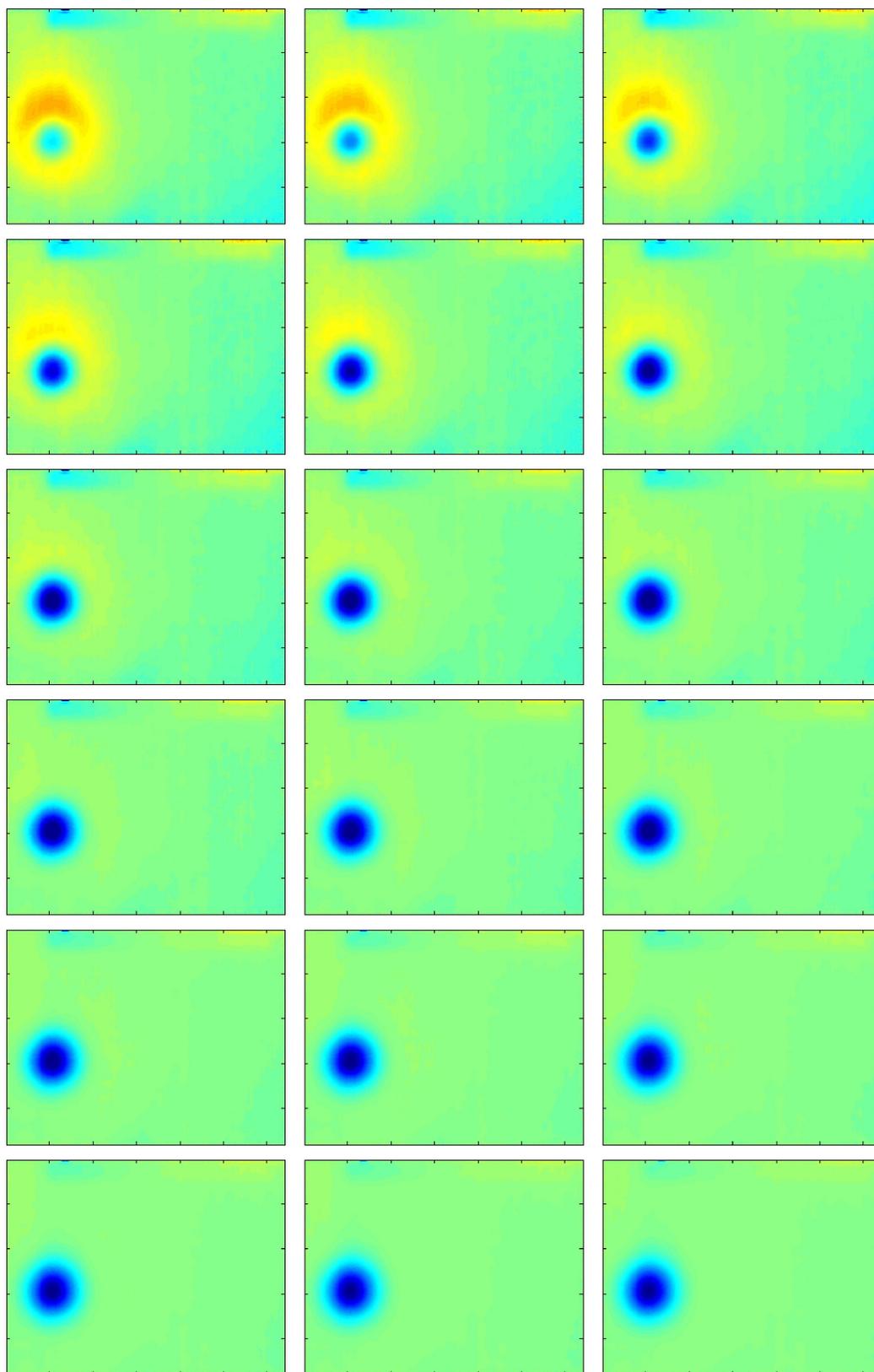


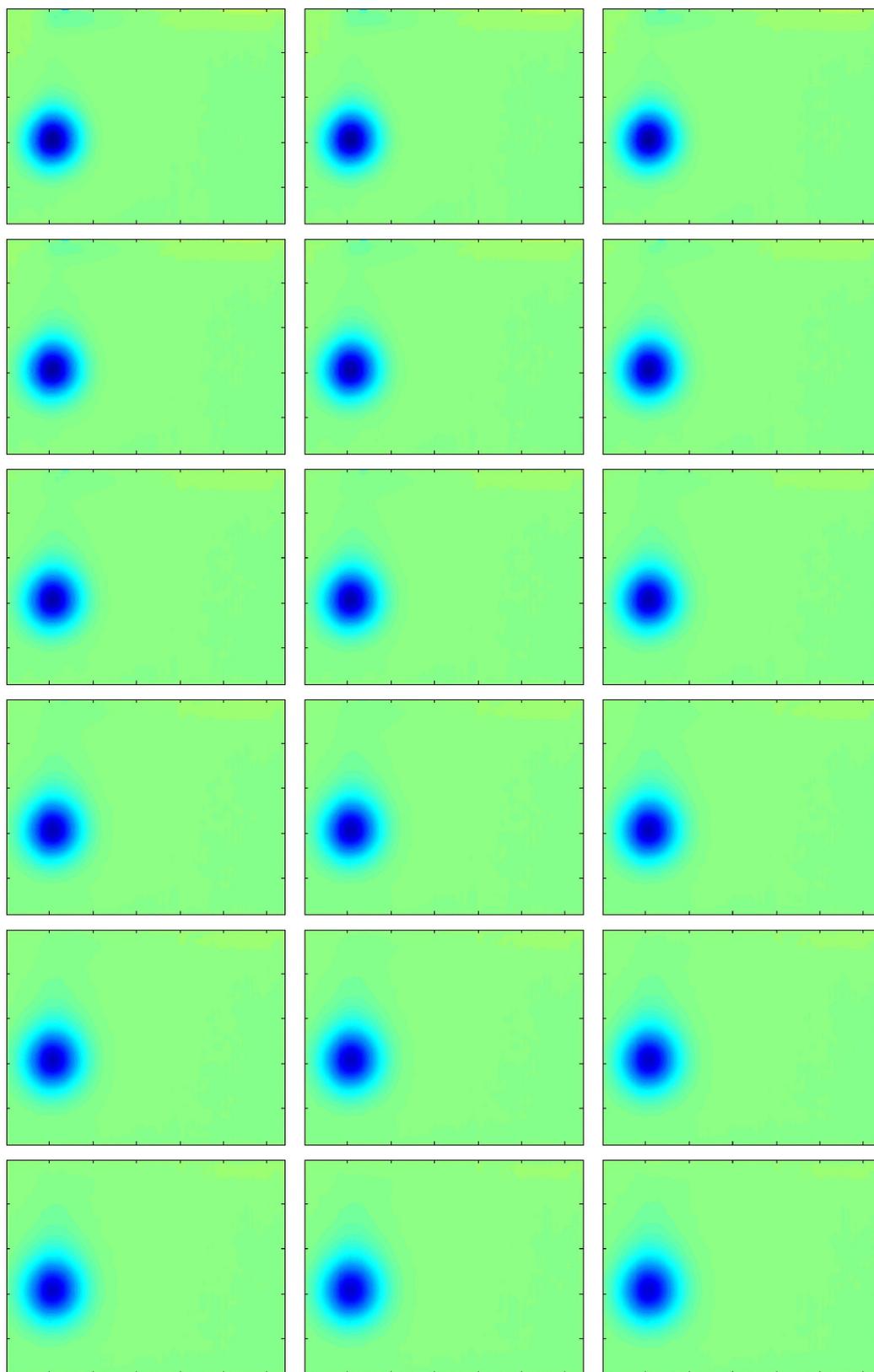


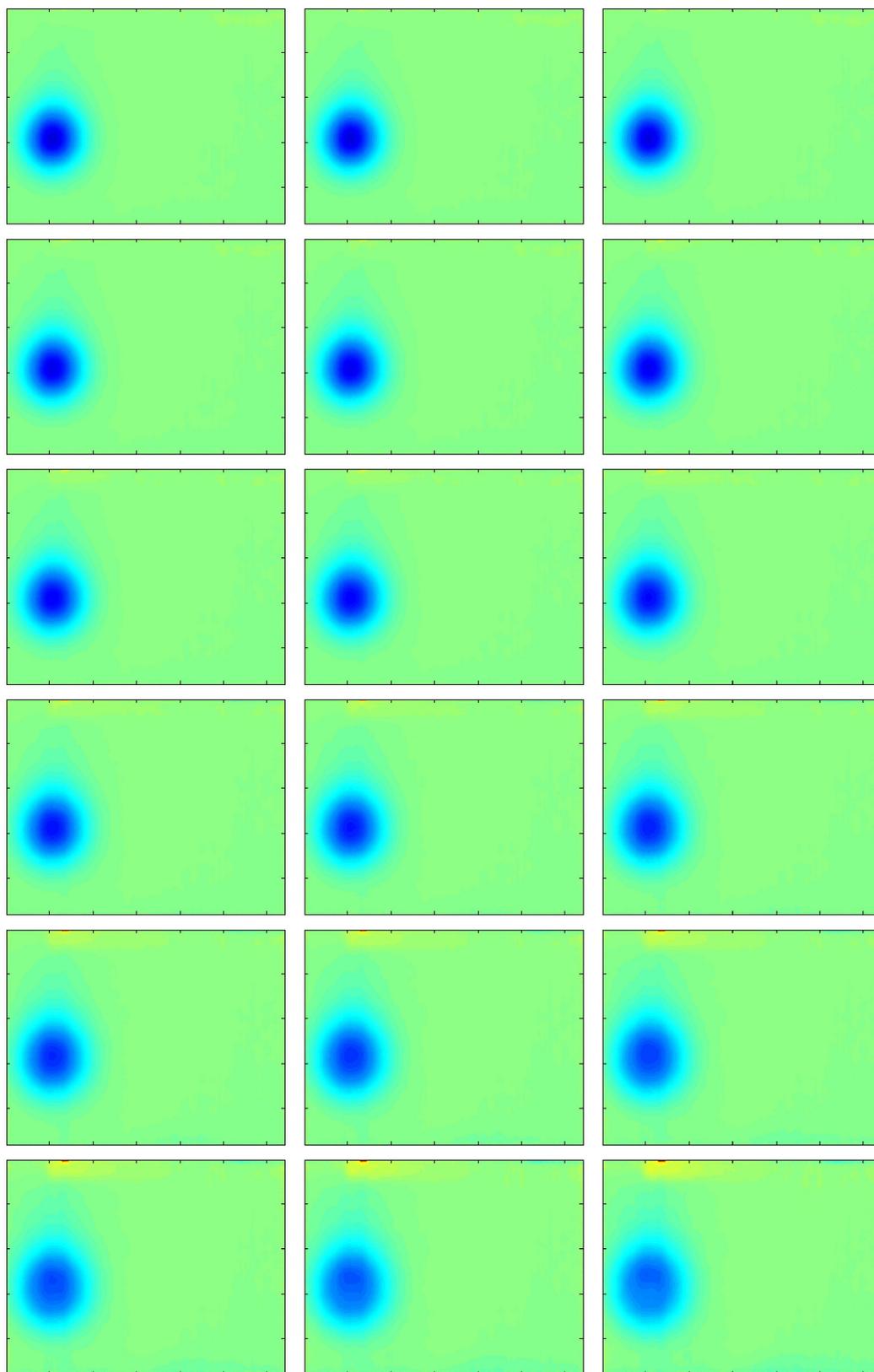


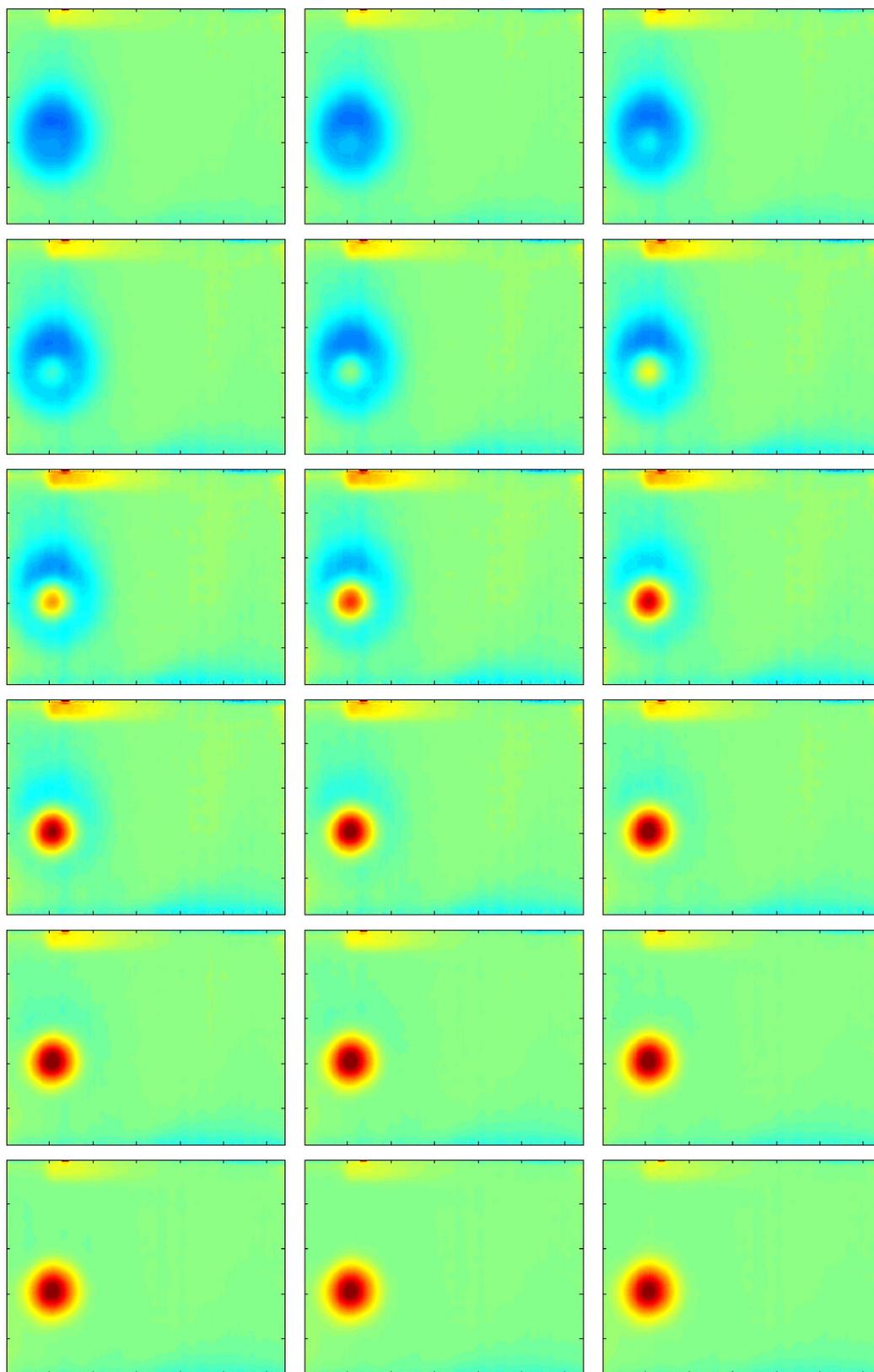


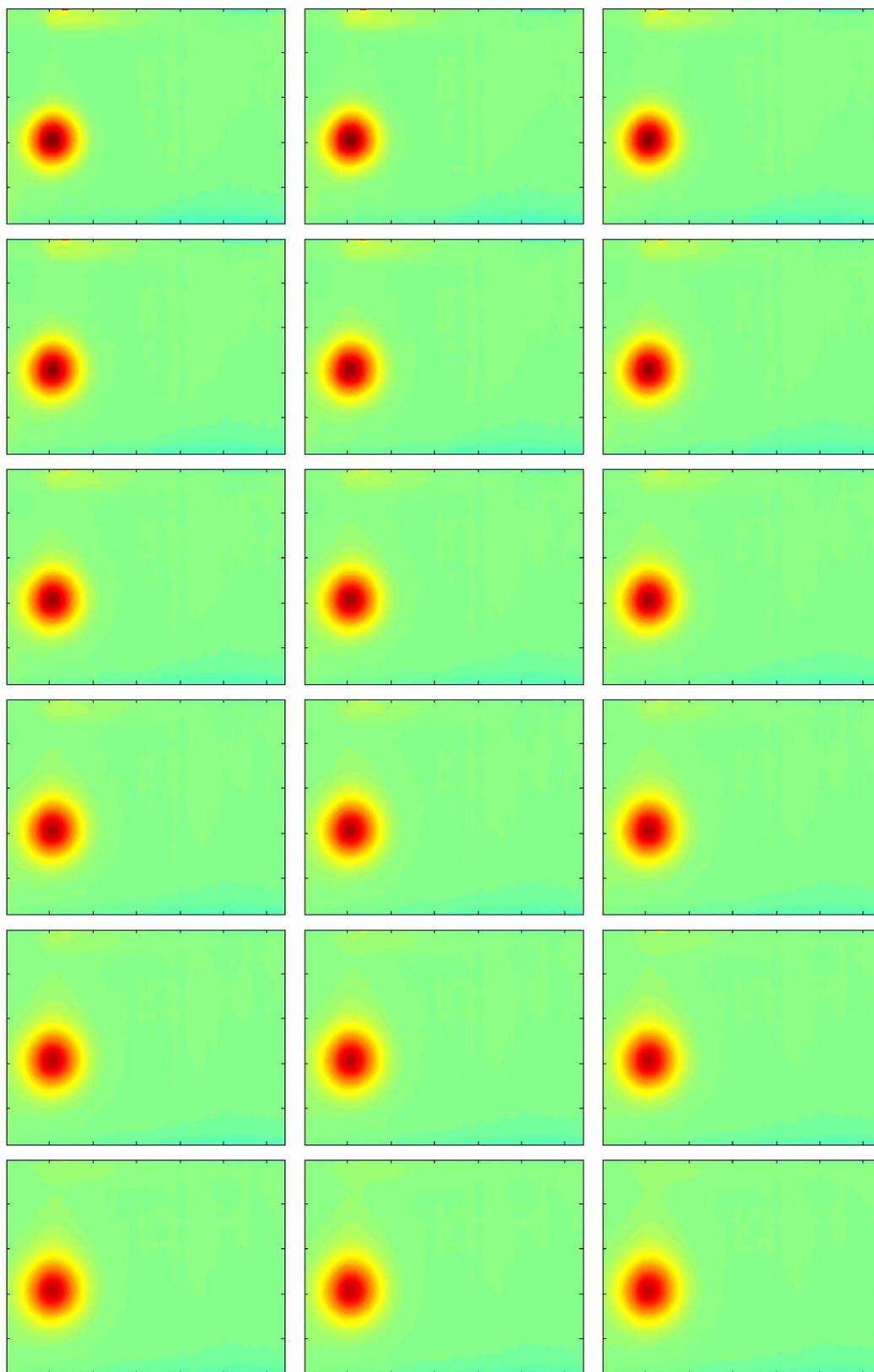


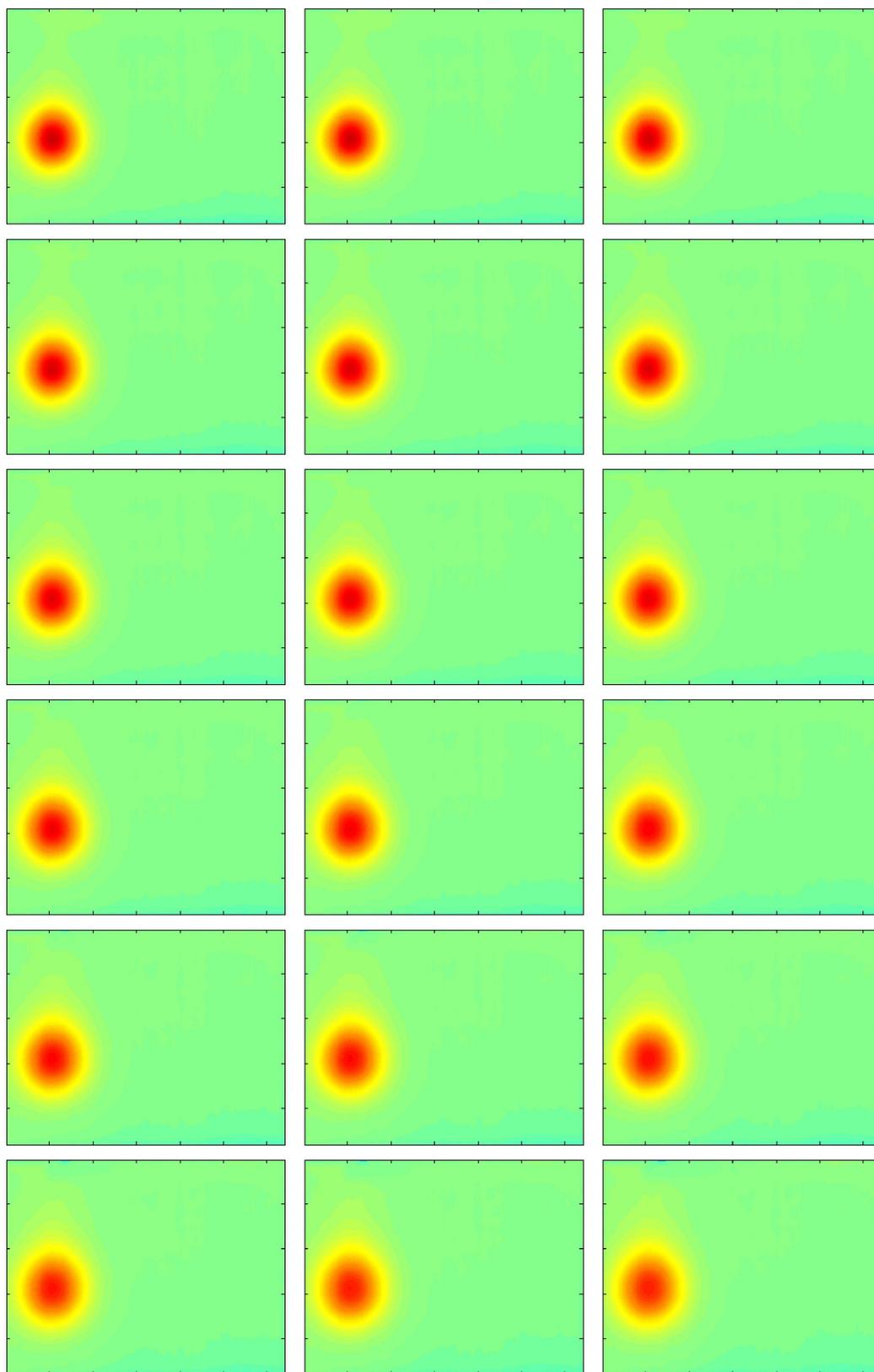


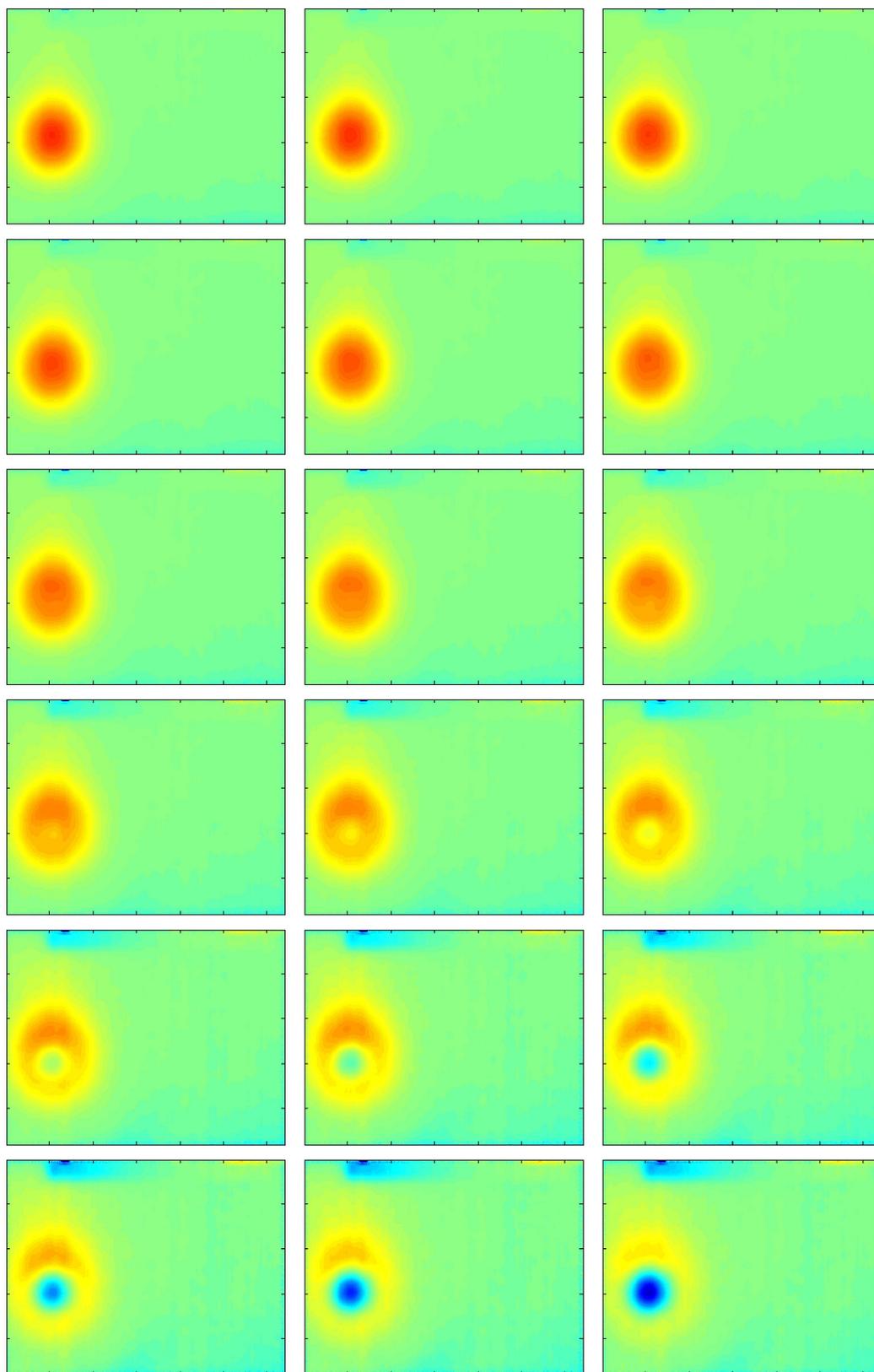


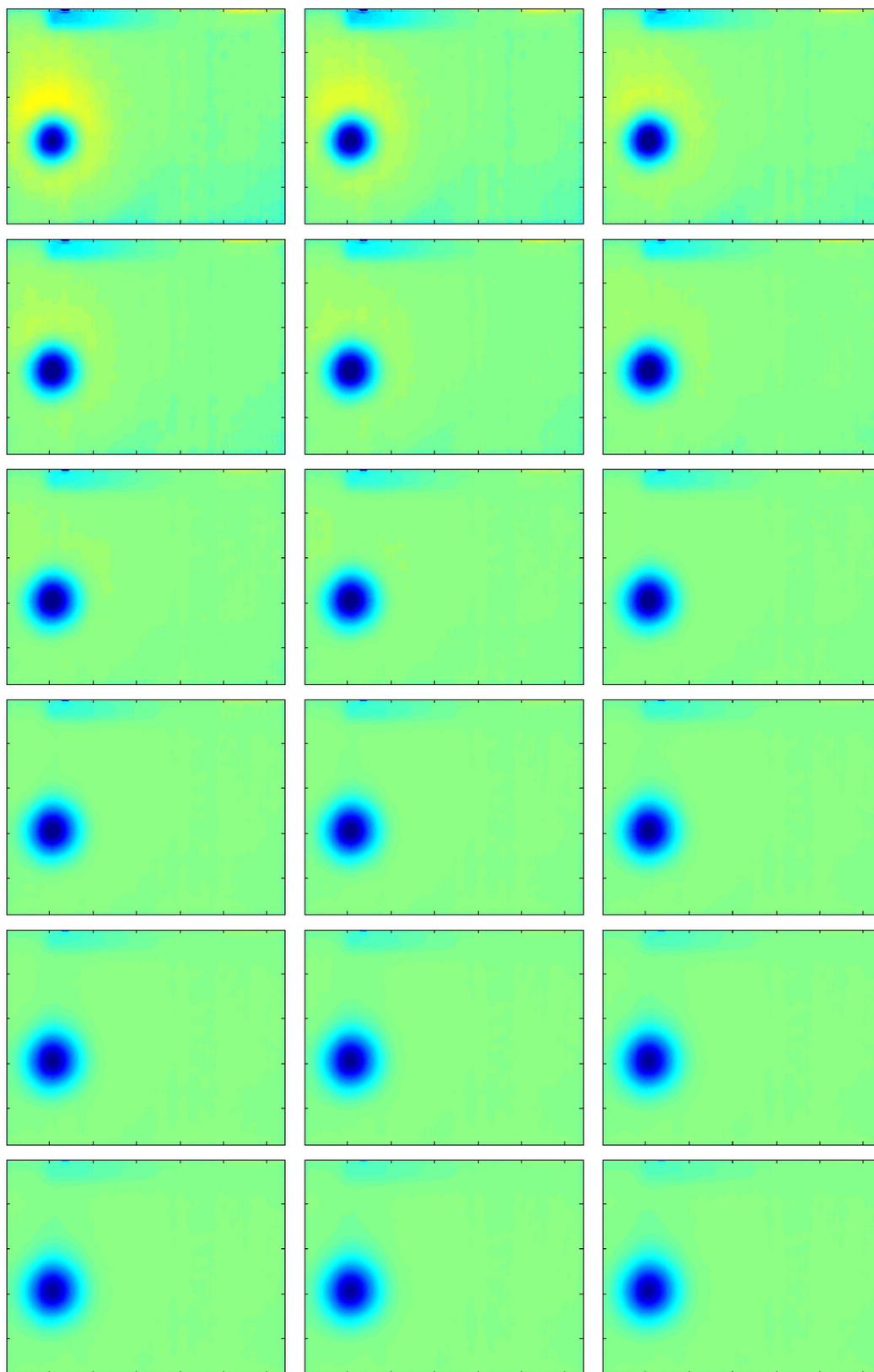


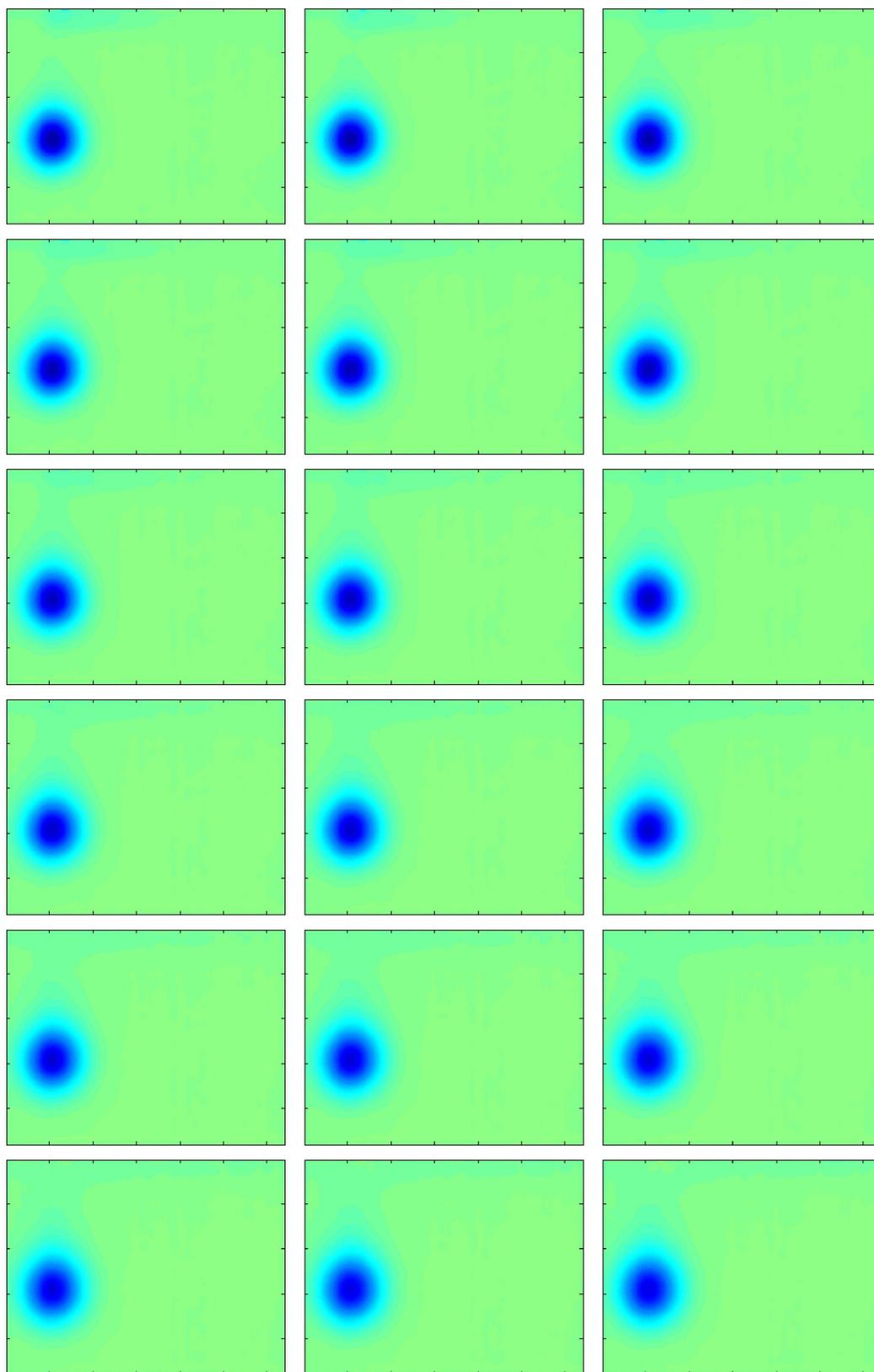


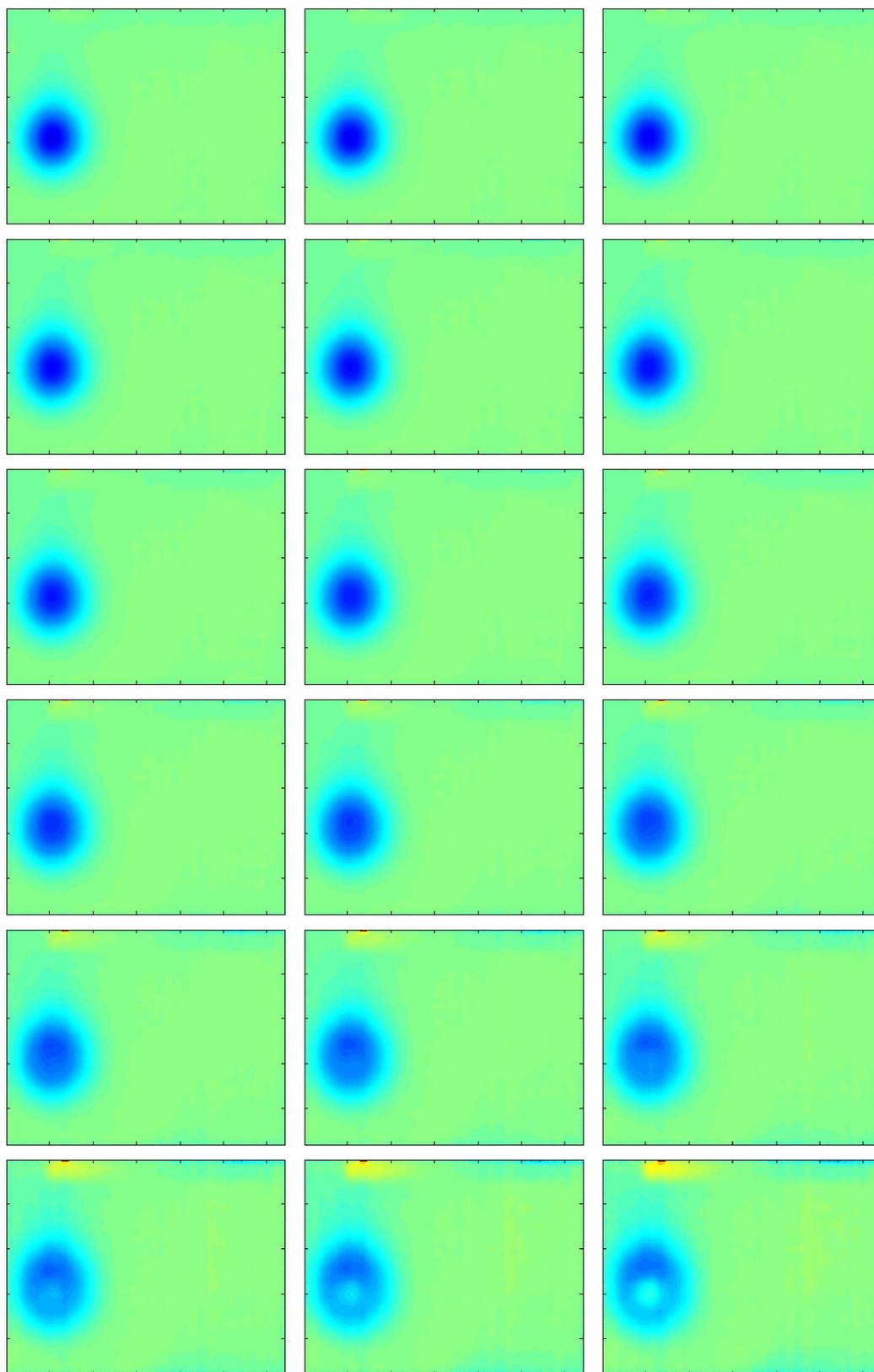












Capitolo 9

Conclusioni

Il presente lavoro si inserisce in un percorso di ricerca più vasto che ha coinvolto il Dipartimento di Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio sotto la guida del prof. Gaetano Ranieri nel corso degli anni. La direzione verso la quale l'attività si è orientata, è rivolta alla messa a punto di una metodologia di tipo tomografico per l'analisi delle prospezioni termiche. Il primo approccio alla tomografia termica secondo un'analogia con il metodo di prospezione geofisico-elettrico è stata impostata nel corso del lavoro di tesi di dottorato dell'ing. Rita Deiana, e svolta nelle parti riguardante la termografia termica con la collaborazione dell'autore. Il termine del lavoro precedente è stato il punto di partenza del presente lavoro ma, naturalmente, la messa a punto di una nuova metodica di indagine non è un lavoro che può essere concluso in un lasso di tempo breve come la durata di un dottorato di ricerca ma richiede sperimentazioni continue ed un lavoro di innovazione che a piccoli passi si muove verso l'obiettivo finale.

I primi capitoli della tesi illustrano lo stato dell'arte da un punto di vista storico, teorico e applicativo, quindi si affronta il tema partendo dall'impostazione analogica di tipo geoelettrico e infine si studia l'impostazione del

problema con un'analogia di tipo sismico.

L'impostazione analogica di tipo geoelettrico comprende l'elaborazione teorica, l'implementazione software e la sperimentazione pratica. L'impostazione teorica è stata condotta sulla falsa riga della tomografia elettrica ed ha consentito di impostare l'algoritmo matematico che tramite il metodo degli elementi finiti conduce all'impostazione di un sistema lineare che sintetizza il problema. L'efficacia del metodo è stata valutata oltre che sul modello già analizzato nella tesi di Dottorato suddetta e sul quale sono state eseguite le prime prove di tomografia termica anche su un sito di prova appositamente realizzato, costituito da una struttura in mattoni di terra cruda completamente interrata. I risultati delle prove hanno permesso di evidenziare i pregi ed i difetti di un approccio di questo tipo, consentendo l'individuazione dell'anomalia di proprietà termica invisibile nei termogrammi grezzi e riconducibile alla presenza nel sottosuolo della struttura simulante un resto archeologico. I limiti emersi nella sperimentazione basata sull'analogia termica-elettrica sono legati principalmente alla precisione delle misure. Gli effetti dell'errore di misura, per via della specifica impostazione matematica, vengono amplificati al crescere della profondità limitando la massima profondità di indagine.

La necessità di superare i limiti individuati, ha spinto verso la messa a punto di una metodica di misura che consentisse di ottenere una maggiore precisione. Impostando infatti l'algoritmo su un input costituito da valori di temperatura o di differenze di temperatura esso risente dell'accuratezza di misura, legata alle soluzioni tecniche adottate nella progettazione e nella costruzione dello strumento, la termocamera, sulla quale non è ovviamente possibile intervenire.

Basandosi sui risultati ottenibili attraverso le tecniche di indagine termografica attiva più avanzate, quale la Lockin e la PPT, si è deciso di optare

per l'utilizzo di una sollecitazione termica di tipo periodico per valutare la possibilità di effettuare misure dei tempi di propagazione delle onde termiche attraverso una misura del ritardo di fase, più complessa da un punto di vista elaborativo ma significativamente più precisa della misura di temperatura semplice. La precisione di un approccio di questo tipo risulta significativamente migliore in quanto legata alla precisione nelle misure dei tempi piuttosto che della temperatura e consentirà in futuro l'applicazione dei metodi interpretativi propri dell'indagine geofisica di tipo sismico. L'obbiettivo era infatti quello di ottenere una misura di elevata precisione dell'evoluzione della temperatura nel tempo, analoga ai dati rappresentati sotto forma di sismogrammi nelle prospezioni sismiche, in modo da poter applicare i metodi di tipo tomografico comunemente utilizzati in campo sismico. La realizzazione della sperimentazione ha richiesto notevoli sforzi in quanto non sono descritti casi in letteratura e perciò l'approccio deve ritenersi assolutamente innovativo.

1. E' stato progettato e realizzato il dispositivo capace di generare un'energizzazione termica periodica localizzata con relativo software di controllo in ambiente LabView;
2. é stato scritto un apposito software in ambiente Matlab che controlla la termocamera tramite l'interfaccia FireWire;
3. sono stati implementati gli algoritmi di filtraggio opportuni per filtrare dal rumore che mascherava l'informazione utile nei termogrammi grezzi;
4. si é infine sviluppato un software che simula analiticamente il modello e risolve il problema diretto di determinazione dei tempi di propagazione note le caratteristiche del modello.

Ciò ha consentito la realizzazione delle misure e dimostrato la possibilità di ottenere i tempi di propagazione di un'onda termica utilizzando un'energizzatore termico del tipo realizzato anche attraverso spessori di materiali altamente isolanti (il modello é realizzato in polistirene estruso ad alta densità e lana di roccia) superando i limiti dei metodi di indagine termografica finora utilizzati che in materiali analoghi sono in grado di investigare al massimo per qualche centimetro di profondità. Come espresso nell'introduzione al presente capitolo, il processo attraverso cui arrivare alla definizione di un metodo di prospezione termico tomografico, in grado di individuare la geometria e le proprietà termiche del substrato utilizzando misure termografiche, e di restituirle sotto forma di immagini facilmente leggibili, così come oggi siamo abituati ad osservare in una TAC medica o in una tomografia geoelettrica, sarà senza dubbio un processo lungo. Tuttavia il contributo metodologico e sperimentale del presente lavoro di ricerca rappresenta senza dubbio un passo in questa direzione. Innumerevoli sono i potenziali campi di applicazione della metodologian proposta. Essi vanno dal campo delle costruzioni ai beni culturali, alle misure ambientali e geotecniche, alla diagnostica dell'efficienza energetica degli edifici. Ognuno di questi campi richiede perciò particolari accorgimenti e metodi di elaborazione. Approcci in alcuni di questi campi sono stati già avviati e appaiono promettenti. La ricerca è ancora aperta a sviluppi teorici e applicazioni in altri campi.

References

- Accardo, G., Bottoni, M., Faretti, G., & Santin, V. 1984. Use of thermography for the diagnosis of moisture distribution in structure of particular importance. *In: Scientific Methodologies Applied to Works of Art.*
- Almond, D. P., & Lau, S.K. 1994. Defect sizing by transient thermography: an analytical treatment. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **27**, 1063–1069.
- ASTM. *ASTM D4788-88. Test method for detecting delaminations in bridge decks using infrared thermography.*
- Avdelidis, N. P., & Moropoulou, A. 2004. Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures. *Journal of Cultural Heritage*, **5**, 119–127.
- Benko, I. 2002. Quantitative analysis of thermal bridges of structures through infrared thermograms. *In: Proceedings of Quantitative Infrared Thermography.*
- Bertani, D., Giorgi, L., & Leoni, G. M. 1983. Preliminary report on a method to obtain emissivity independent thermographic images. *In: First International Conference on Nondestructive testing in the conservation of Works of Art.*

- Boninu, A., Finotti, F., & Tonelli, A. 1997. Multitemporal Thermal Surveying on monuments. *In: 10th International THERMO Conference - Budapest.*
- Boras, I., & Svaic, S. 2002. 3D numerical model for heat conduction analysis based on IR thermography. *In: Proceedings of Quantitative Infrared Thermography.*
- Brink, A., Maierhofer, Ch., Rolling, M., & Wiggerhauser, H. 2002. Application of quantitative impulse thermography for structural evaluation in civil engineering - Comparison of experimental results and numerical simulations. *In: Proceedings of Quantitative Infrared Thermography.*
- Brivio, P.A., Giuduce, E. Lo, & Zilioli, E. 1989. Thermal Infrared surveys at Vulcano Island: an experimental approach to the thermal monitoring of volcanoes. *In: IAVCEI Proceedings in Volcanology.*
- Brivio, P.A., Tomasoni, R., Zilioli, E., Brizzolati, E., Cardarelli, E., & Scialla, P. 1993. Application of thermography to the structure analysis of the Coliseum pillars. *In: Proceedings of the Workshop Advanced Infrared Technology and Application.*
- Brivio, P.A., Tomasoni, R., Zilioli, E., Brizzolati, E., Cardarelli, E., & Scialla, P. 1994. Application of thermography to the structure analysis of the Coliseum pillars. *In: Proceedings of the Workshop Advanced Infrared Technology and Application. Casa Malaparte- Capri (Italy).*
- Caneva, C., Panpallona, A., & Testa, G. 1988. Le indagini termografiche e termoigrometriche per il rilievo dell'umidità negli affreschi. *In: Proceedings of the 2nd International Conference on Non-Destructive Test.*

- Cardarelli, E., & Puledda, S. 1995. Alcuni esempi di tomografia a raggi curvilinei con fattori di damping variabili. *In: Atti del 14^o Convegno Nazionale del GNGTS.*
- Carlomagno, G. M., & Meola, C. 2001. Infrared thermography in the restoration of cultural properties. *In: Thermosense XXIII Proceedings.*
- Carlomagno, Giovanni M., & Meola, Carosena. 2002. Comparison between thermographic techniques for frescoes NDT. *Pages 559–565 of: NDT&E International.*
- Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. 1946. *Conduction of Heat in Solids.* Oxford Science Publications.
- Cassinis, R., & Lechi, G. M. 1947. The use of infrared radiometry in geothermal areas. *Physical Pulcanology*, **1**, 5.
- Castellano, Alfredo, Martini, Marco, & Sibilìa, Emanuela. 2002. *Elementi di Archeometria.* Egea.
- Cawley, P., Morbidini, M., Duffour, P. and Almond, D., & Barden, T. 2006. The relationship between vibration level and minimum detectable defect size in Sonic-IR inspection. *In: ECNDT 2006 Proceedings.*
- Cengel, Y. A. 1998. *Termodinamica e trasmissione del calore.* McGraw-Hill.
- Cernuschi, F., Ludwig, N., Teruzzi, P., & Bottazzi, G. 1998. A critical analysis and possible modifications of two analytical models for defects sizing using video pulse thermography. *Pages 205–209 of: Proceeding of Quantitative Infrared thermography.*

- Cielo, P., Maldague, X., Deom, A.A., & Lewak, R. 1987. Thermographic nondestructive evaluation of industrial materials and structures. *In: Material Evaluation*.
- Colombo. 1985. *Manuale dell'ingegnere*. Hoelpli.
- Deiana, R. 2004. *Metodi non distruttivi nella diagnostica delle strutture edilizie*. Ph.D. thesis, Università di Palermo.
- Espositi, W. 1982. *La termografia infrarossa per il controllo del comportamento termocinetico degli edifici*. Vol. 7-8. Modulo.
- Grinzato, E. 2002. IR Termografy applied to historical buildings. *In: Proceedings of quantitative infrared thermography*.
- Gupta, R., & Tuli, S. 2005. Electro-Thermal modeling and analysis for estimation of defect parameters by stepped infrared thermography. *NDT&E International Thermography*, **38**, 11–19.
- Kashimura, M. 2000a. *Infrared Thermal Imaging System - TVS technical report*. Nippon Avionics Co.LTD.
- Kashimura, M. 2000b. *The TVS-2000ST Infrared Thermal Imaging System - TVS technical report*. Nippon Avionics Co.LTD.
- Kelvin, W. T. 1862. On the reduction of observations of underground temperature; with application to professor Frobess' Edinburgh observations, and the continued Calton Hill series. *Page 125 of: Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*. 3rd, vol. II.
- Luciani, R., & Mocchegiani, C. 1980. Considerazioni sul degrado degli antichi monumenti romani. *Rivista dell'istituto nazionale d'archeologia e storia dell'arte*, **1**, 45–91.

- Ludwig, N. 2002. *Tecniche termografiche per la diagnostica sull'edilizia storica - Elementi di archeometria*. EGEA.
- Ludwig, N., Rosina, E., & Brambille, L. 1995. L'analisi multispettrale delle proprietà ottiche del cotto per la valutazione della diagnostica termovisiva su antichi edifici. *In: Conferenza nazionale sulle prove non distruttive, Torino*.
- Luprano, V.A., Bison, P., Grinzato, E., Marinetti, S., Tati, A., & Tundo, A. 2006. Non destructive defect characterization in civil structures reinforced by means of FRP. *In: ECNDT 2006 Proceedings*.
- Mandelis, A., Nicolaides, L., & Che, Yan. 2001. Structure and the reflectionless/refractionless nature of parabolic diffusion-wave fields. *Physical review letters*, **87**(2), 2.
- Meola, Carosena, & Carlomagno, Giovanni M. 2004. Recent advances in the use of infrared thermography. *Measurement Science and Technology*, **9**(9), 123.
- Milazzo, M., Ludwig, N., & Poldi, G. 1998. Moisture detection in walls through measurements of temperature. *In: Proceedings of quantitative infrared thermography*.
- Oddone, M. Anno Accademico 2005-2006. *Lezioni di Archeometria*. Appunti delle lezioni.
- Ongaro, A., & Berardi, A. 1982. *Rapporto sulle prime campagne di misure al Cenacolo Vinciano*. Istituto centrale del restauro, Roma.
- Piga, C., Ranieri, G., & Deiana, R. 2006. First results from thermal tomography in the study of wall structures and archaeological layers. *In: Pro-*

- ceedings of the 12th european meeting of environmentaland engineering geophysics.*
- Pitts, D. R., & Sissom, L. E. 1982. *Teoria e problemi di trasmissione di calore.* Collana Schaum.
- Rosina, E., Grinzato, E., & Morandotti, D. 2004. *La percezione oltre l'apparenza: l'architettura all'infrarosso.* Alinea Editrice.
- Saintey, N. B., & Almond, D. P. 1995. Defect sizing by transient thermography II: a numerical treatment. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **28**, 2539–2546.
- Santoli, L. De. 1999. *Fisica Tecnica Ambientale - Trasmissione del calore.* Vol. 2. Casa Editrice Ambrosiana.
- Schickert, G. 1985. Infrared thermography as a possible tool to detect damaged areas in buildings. *Pages 87–79 of: Durability of building material, Amsterdam*, vol. 3.
- Seracini, M. 1981. La termovisione come strumento di indagine non invasiva nella diagnostica architettonica. *In: Atti del I congresso nazionale Assirco, Verona.*
- Seracini, M., & Ruffa, G. 1983. L'impiego dell'indagine termografica nello studio non distruttivo di strutture murarie. *In: Recupero Edilizio, Bologna, 2.*
- Sharma, P. V. 1997. *Environmental and engineering geophysics.* Cambridge University Press.

- Shendeleva, M. L. 2001a. Reflection and Refraction of a transient temperature field at a plane interface using Cagniard-de Hoop approach. *Physical Review E*, **64**(036612), 64–70.
- Shendeleva, M. L. 2001b. Thermal reflection and refraction at a plane interface: Two-dimensional geometry. *Physical Review B*, **65**(134209), 65–72.
- Shendeleva, M. L. 2003. Determination of thermal diffusivity using the critical angle in thermal wave reflection at an interface. *Review of Scientific Instruments*, **74**(1), 430–432.
- Shendeleva, M. L. 2004. Instantaneous line heat source near a plane interface. *Journal of applied physics*, **95**(5), 5.
- Slater, P. N. 1980. *Remote sensing optics and optical systems*. Addison Wesley.
- UNI. *Isolamento termico. Rilievo ed analisi qualitativa delle irregolarità termiche negli involucri degli edifici. Metodo della termografia all'infrarosso*.
- UNI. *Prove non distruttive. Termografia all'infrarosso. Termini e definizioni*.
- Wang, P., Li, X., Sun, W., Li, X., Zhang, S., & Liu, A. 2004. Soil thermal inertia estimation by combining afternoon and morning AVHRR data with a modified diurnal land surface temperature change model. *In: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. Proceedings. 2004 IEEE International*.
- Weil, G. J. 1998. Remote sensing of voids in large concrete structures: run-

- ways, taxiways, bridges, and building walls and roofs. *Pages 305–316 of:* B. F. Andresen, M. S. Scholl (ed), *Infrared technology and applications*.
- Wolff, W. L., & Zassr, G. J. 1978. *The infrared handbook*. ERIM.
- Wood, S., & Four Star Cleaning and Restoration, Inc. 2004. Non-Invasive Roof Leak Detection Using Infrared Thermography. *In: InfraMation 2004 Proceedings*.
- Zilioli, F. 1979a. Il transitorio termico delle rocce con metodologie per lo studio delle frane di crollo. *In: Disertation at University of Milan, Italy*.
- Zilioli, F. 1979b. Thermal profile within a snow cover and temporal analysis for avalanche hazard. *Pages 317–330 of: Proceedings of Tagang Elektronik und Ladwnev - University of Graz*.
- Zilioli, F., Comarasca, M. A., & Tomasoni, R. 1992. Application of thermal tomography to the detection of waste disposal sites. *Remote Sensing Enviroment*, **40**, 153–160.