

**SVILUPPO di ALGORITMI NUMERICI per
l'INTERPRETAZIONE di DATI TERMOGRAFICI.
APPLICAZIONI a MISURE di LABORATORIO e di
SITO (CASA di M. F. RUFO, POMPEI)**

X Workshop in Geofisica
Rovereto, 06/12/2013

Relatore: dott.ssa **Antonietta Chiapparino**

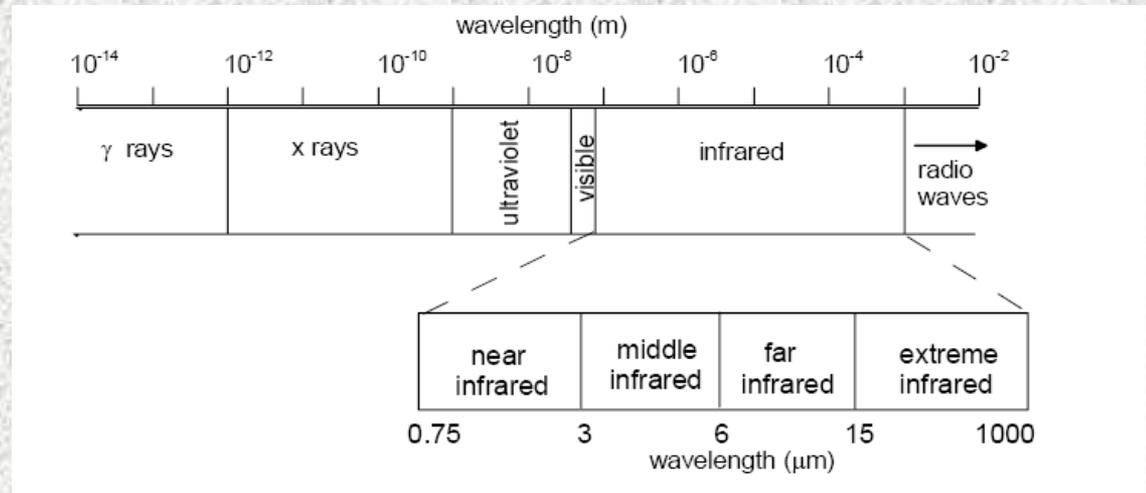
Obiettivo del lavoro di Tesi: analisi quantitativa di dati termografici attraverso

- Sviluppo di algoritmi numerici 1D e 2D
- Validazione mediante dati termografici di laboratorio
- Applicazione a misure termografiche di sito

Termografia all'Infrarosso: Principi Fisici



Radiazione IR



Termocamera ad Infrarossi

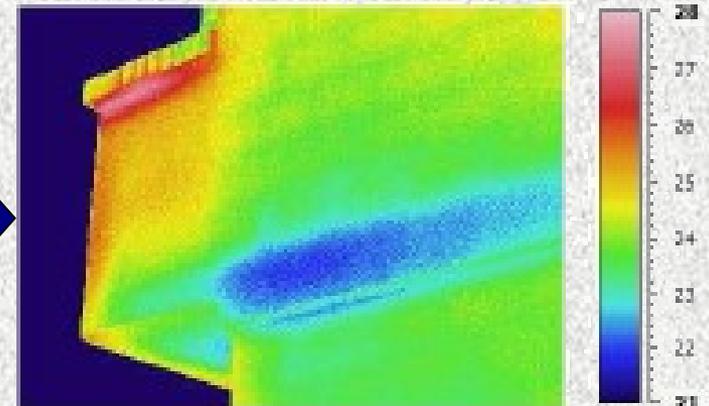
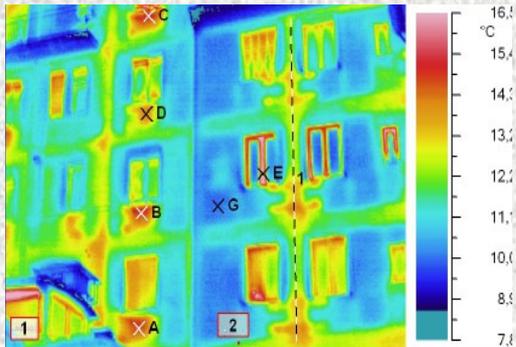


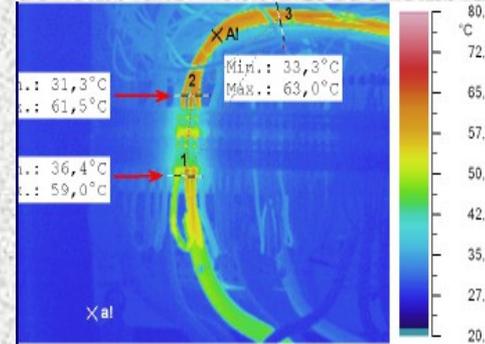
Immagine Termica

Termografia all'Infrarosso: Applicazioni

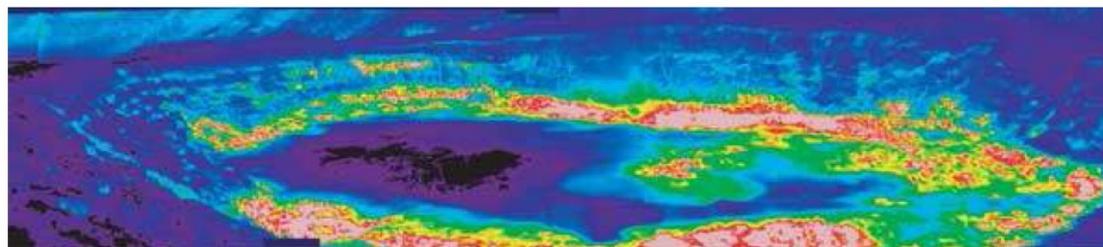
Certificazione Energetica



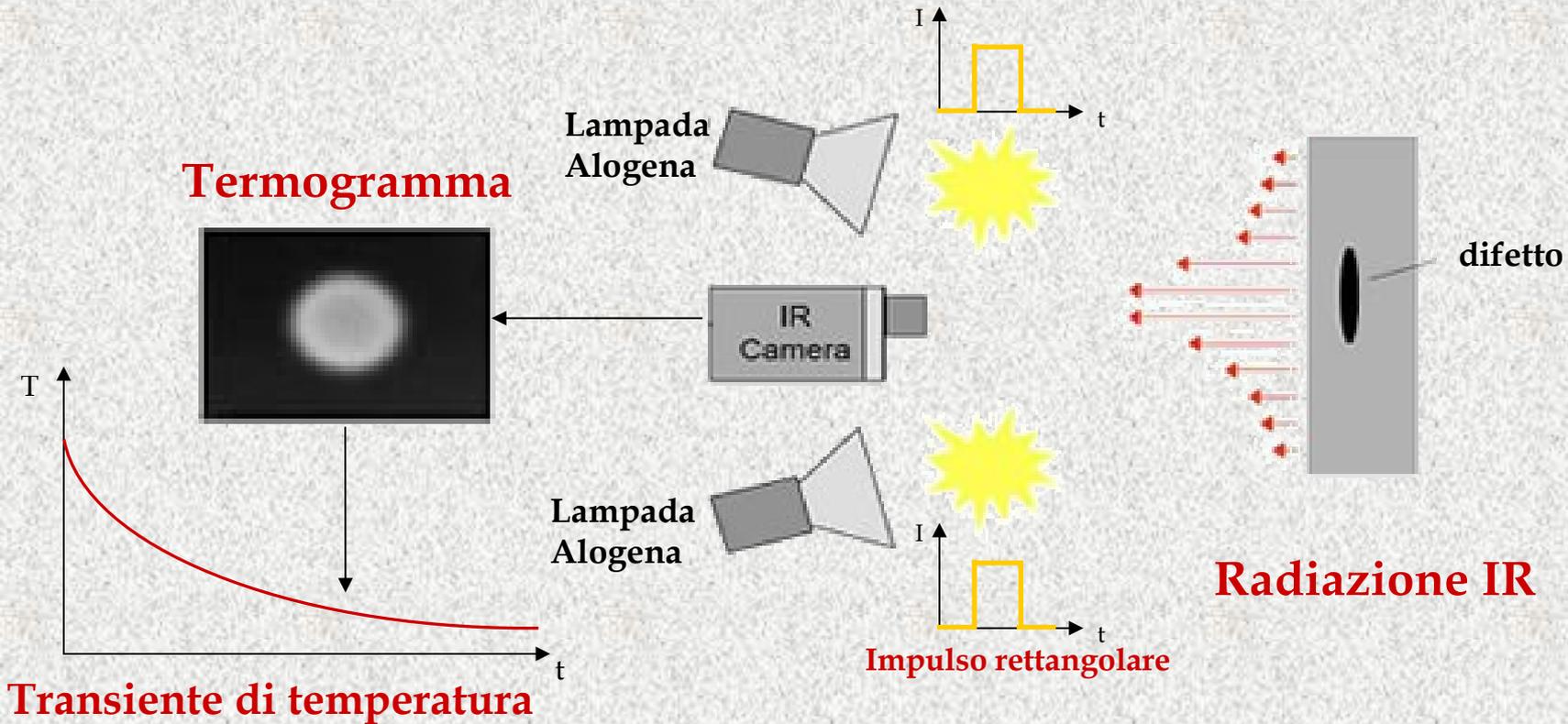
Manutenzione degli Impianti elettrici



Rilevamento Territoriale



Nell'ambito della diagnostica dei beni culturali, delle strutture architettoniche ed ingegneristiche, la tecnica termografica più comunemente utilizzata è rappresentata dalla **Termografia Impulsiva**, in cui la superficie del mezzo investigato viene stimolata attraverso un impulso termico rettangolare.



Nel corso della stimolazione, una parte della radiazione incidente sulla superficie dell'oggetto è assorbita e trasformata in energia termica, che si propaga per diffusione termica all'interno del mezzo; a causa della propagazione del fronte termico e delle perdite di calore per radiazione e convezione, la temperatura superficiale del materiale cambia rapidamente. Tale variazione è registrata, ad intervalli di tempo regolari, attraverso la strumentazione termografica, in maniera tale da ottenere una curva di crescita e di decadimento della temperatura superficiale. L'eventuale presenza di un difetto all'interno del mezzo riduce o incrementa il tasso di diffusione così che, in superficie, i difetti appaiono come aree a temperature differenti rispetto al mezzo integro circostante.

Teoria dell'Inversione Applicata alla Termografia Impulsiva

Problema Diretto



Problema Inverso



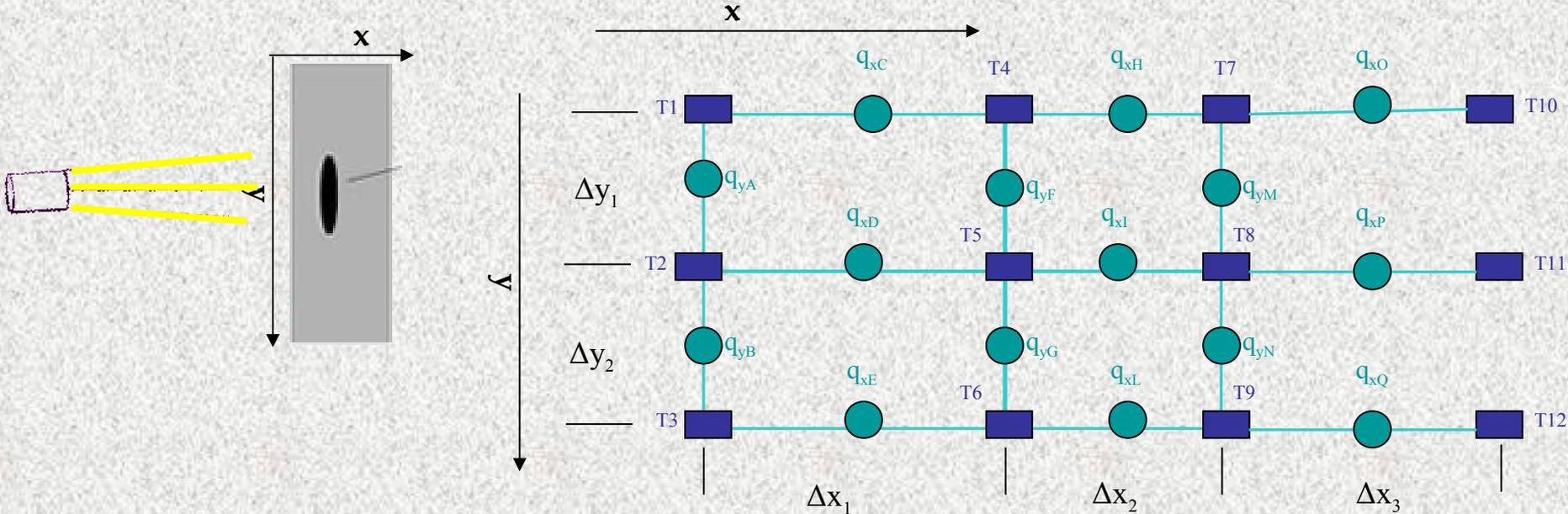
Nel presente lavoro di tesi è stato risolto il problema termico diretto, ossia è stata risolta l'equazione della conduzione del calore in mezzi non omogenei attraverso lo sviluppo di un codice numerico basato sul metodo delle Differenze Finite (nei casi 1D e 2D), in cui l'equazione differenziale è sostituita da un set di equazioni algebriche valutate per un insieme finito di posizioni spaziali e di istanti di tempo.

Sviluppo dell' Algoritmo Numerico 2D

EQUAZIONE della CONDUZIONE del CALORE 2D: $\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - k \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = 0$



DISCRETIZZAZIONE mediante DIFFERENZE FINITE:

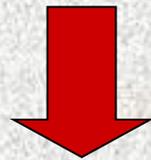


Griglia utilizzata nel caso del codice bidimensionale; essa è costituita da una serie di nodi principali (T_i), in corrispondenza dei quali viene formulata l'equazione del calore e vengono definite la densità e il calore specifico, e una serie di nodi addizionali (q), in corrispondenza dei quali viene definita la conducibilità termica e viene determinato il flusso di calore.

L'equazione del calore, discretizzata attraverso il metodo delle Differenze Finite e valida per un mezzo omogeneo, assume la seguente forma:

$$\frac{T_{i,j}^n}{\Delta t} - \frac{k}{\rho \cdot C} \cdot \left(\frac{T_{i-1,j}^n - 2 \cdot T_{i,j}^n + T_{i+1,j}^n}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j-1}^n - 2 \cdot T_{i,j}^n + T_{i,j+1}^n}{\Delta y^2} \right) = \frac{T_{i,j}^{n-1}}{\Delta t}$$

Indagine Termografica di Laboratorio

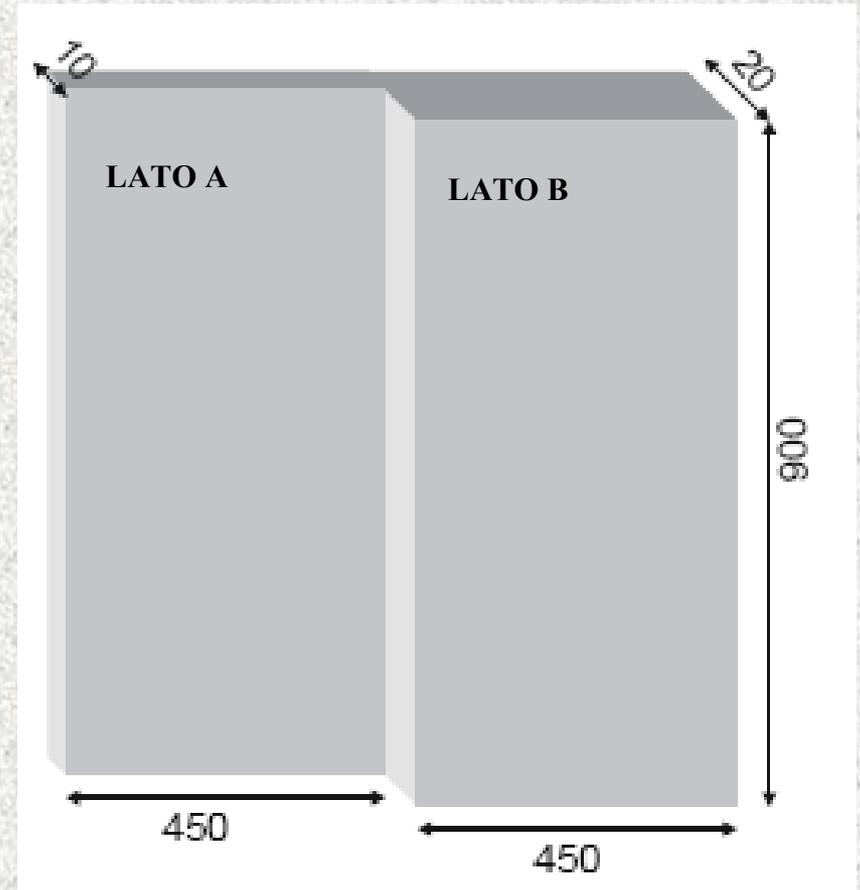
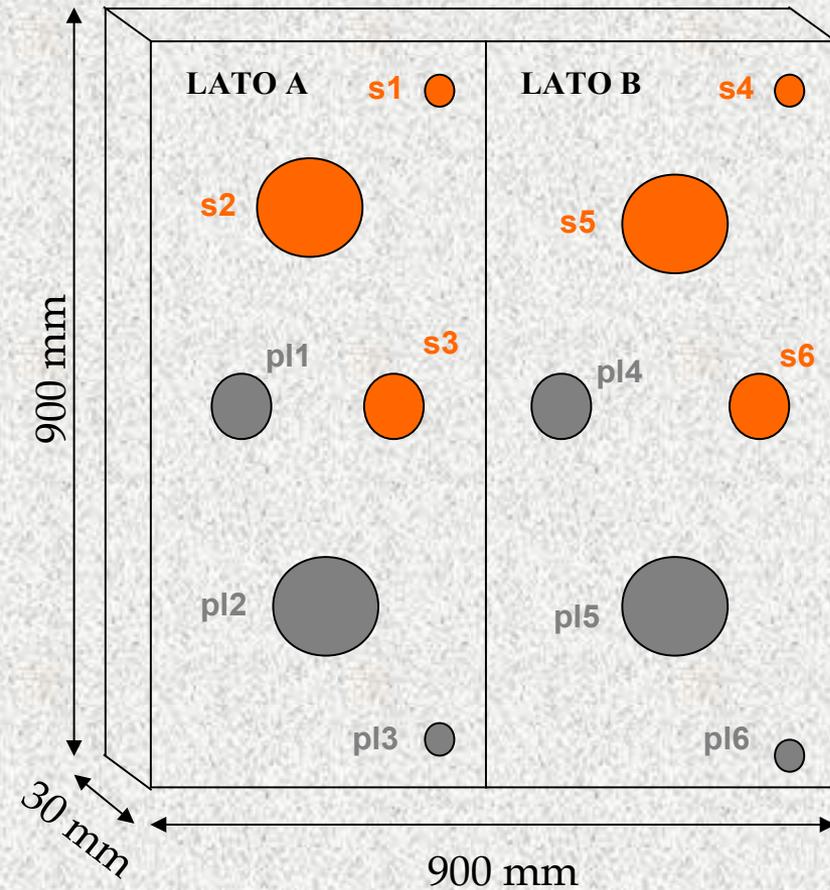


Validazione dei codici numerici

Indagine di Laboratorio: Apparato di Misura

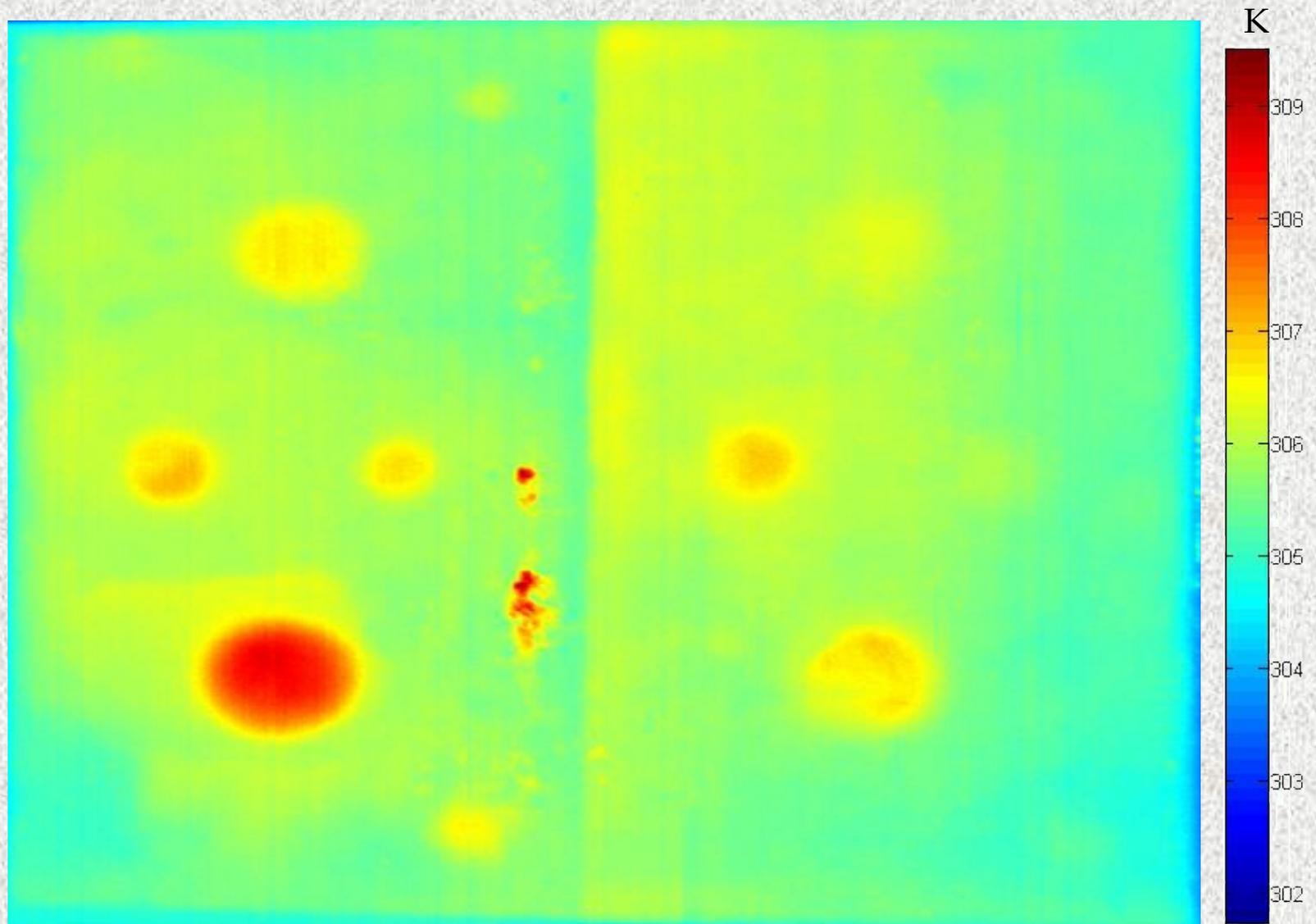


Indagine di Laboratorio: Descrizione del Pannello

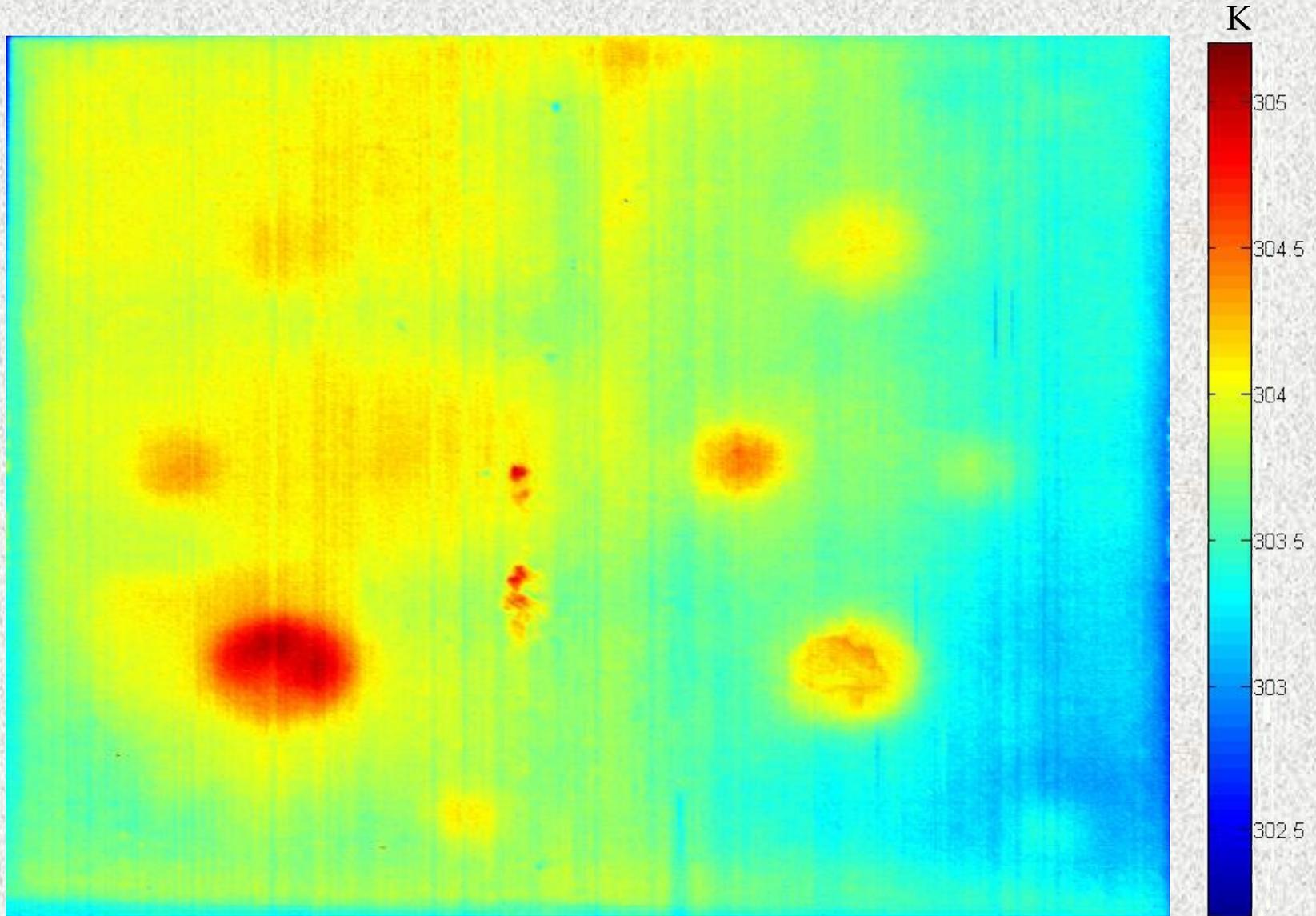


La prova di laboratorio utilizzata per la validazione dei codici numerici è stata condotta su di un provino realizzato in modo da simulare i tipici difetti che si possono incontrare nel caso di strutture murarie sia di interesse ingegneristico che dei Beni Culturali. Esso è costituito da una base di marmo divisa in due zone (lato A e lato B); su ciascun lato sono presenti sei dischetti (3 in plastica e 3 in sughero) simulanti la presenza di aria. I difetti, e la sottostante base di marmo, sono ricoperti da uno strato di intonaco avente uno spessore di 10 mm in corrispondenza del lato A e di 20 mm in corrispondenza del lato B.

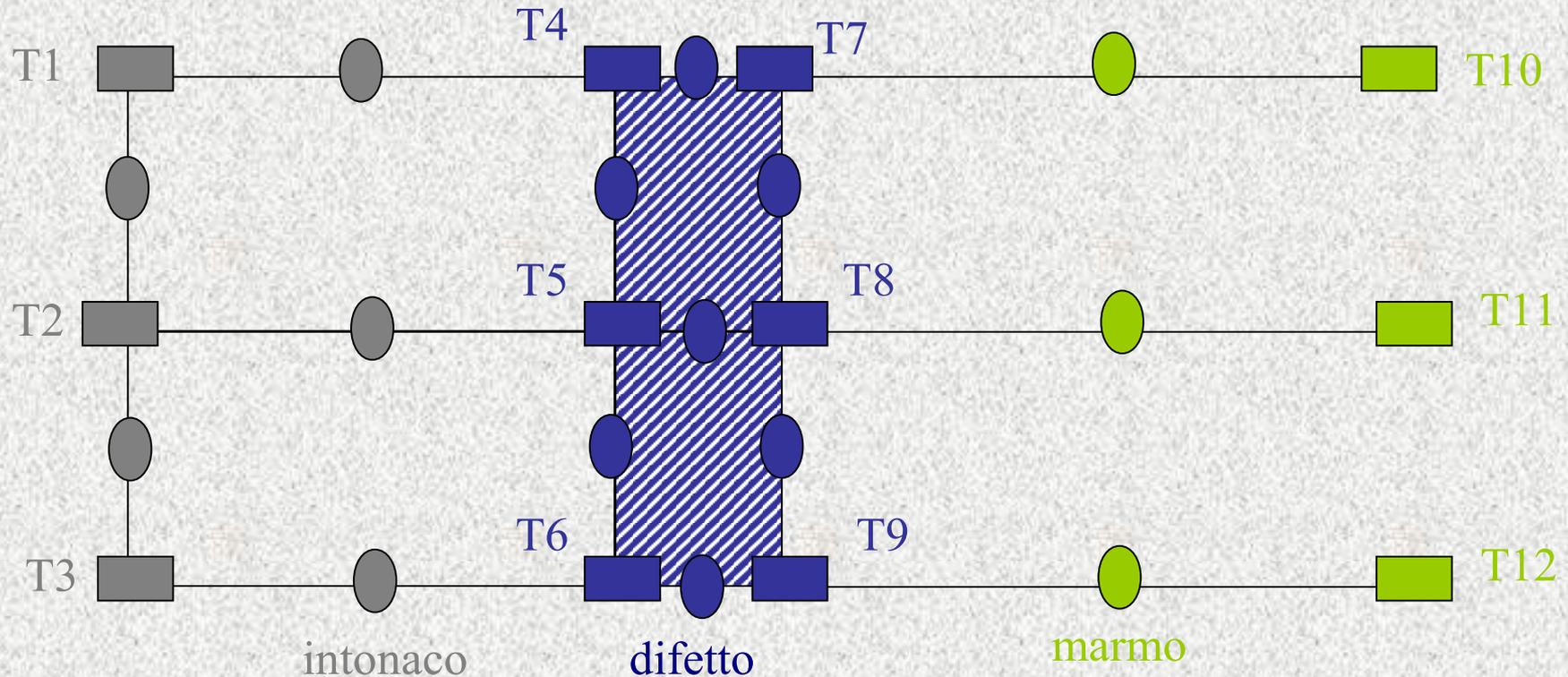
Termogramma Acquisito dopo 140 s da inizio raffreddamento



Termogramma Acquisito dopo 650 s da inizio raffreddamento

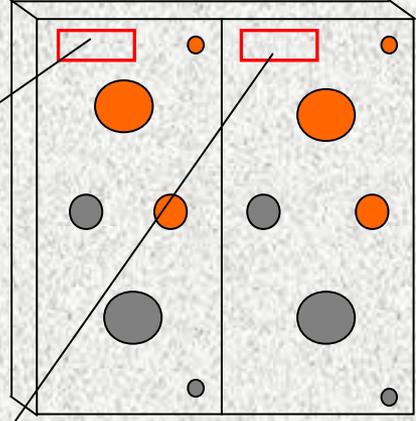
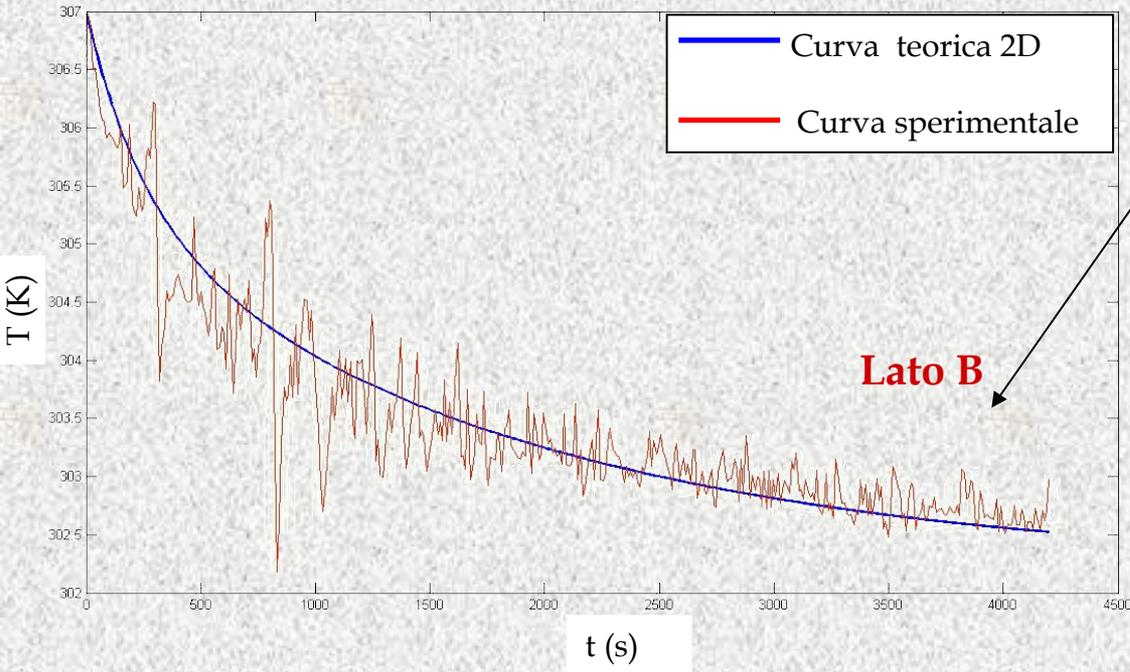
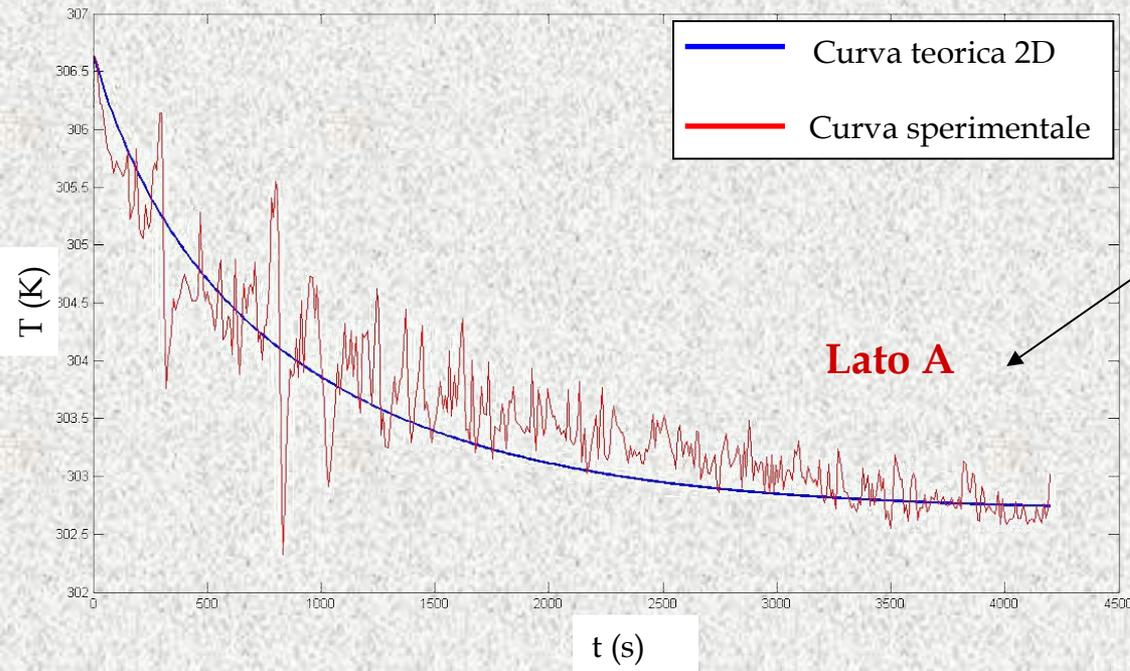


Applicazione del Codice Numerico 2D al Provino di Laboratorio



Input: densità (ρ), calore specifico (C) e conducibilità termica (K); Δx e Δy ; temperatura iniziale.

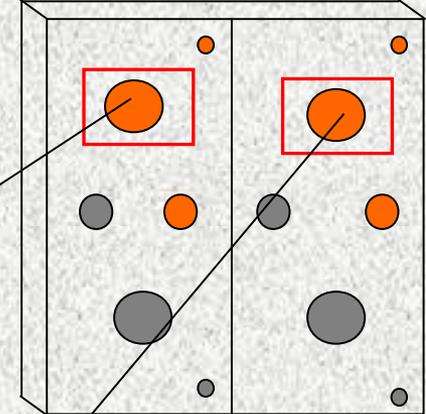
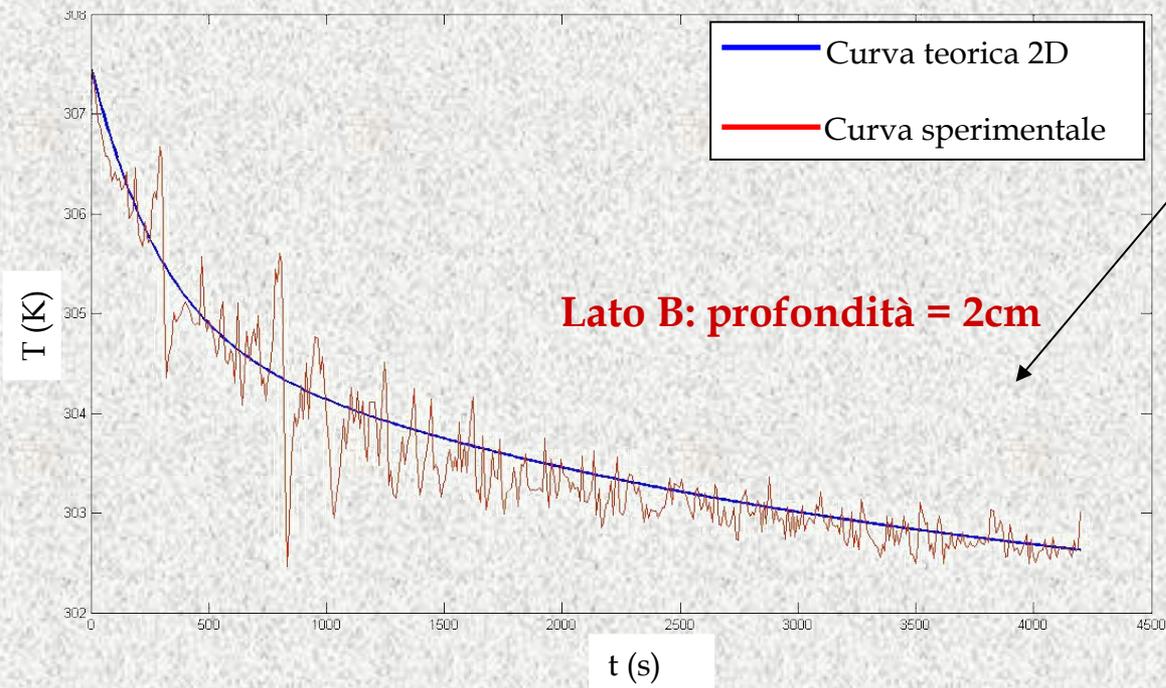
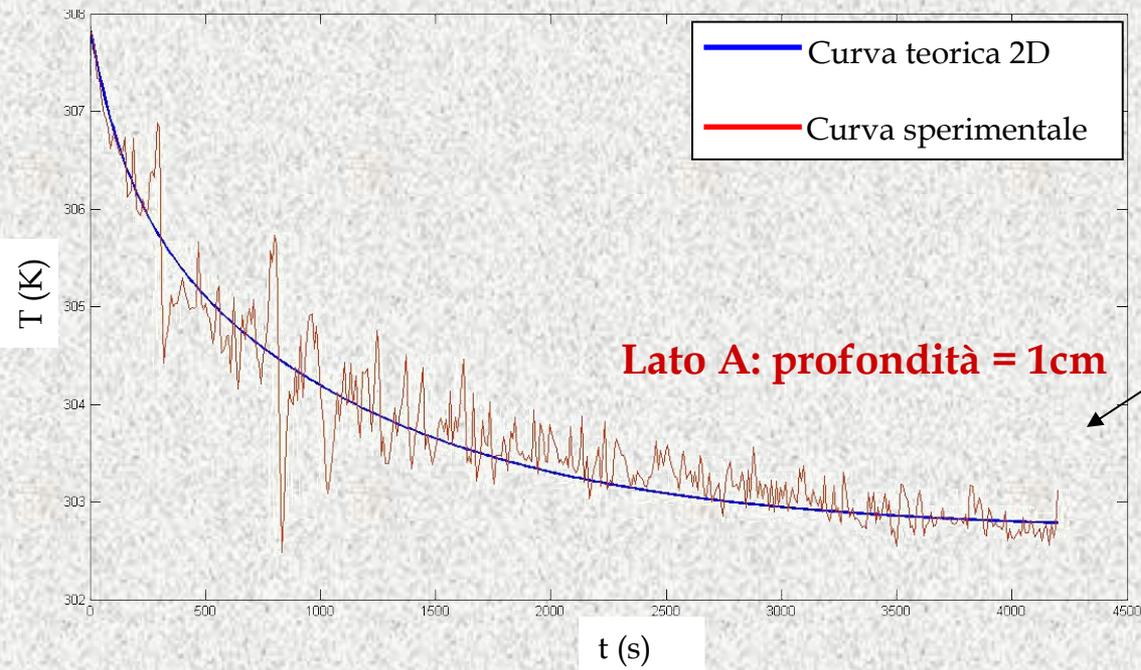
Output: andamento temporale della temperatura.



Mezzo Integro

	k	C	ρ
Marmo	2.3	800	2750
Intonaco	0.25	860	1600

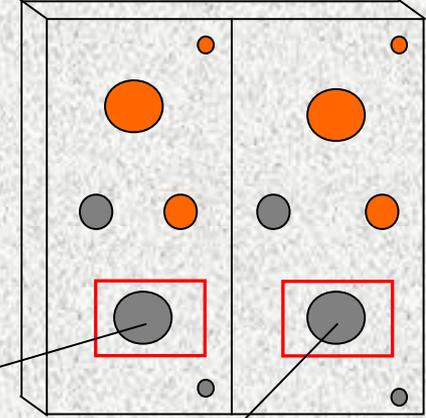
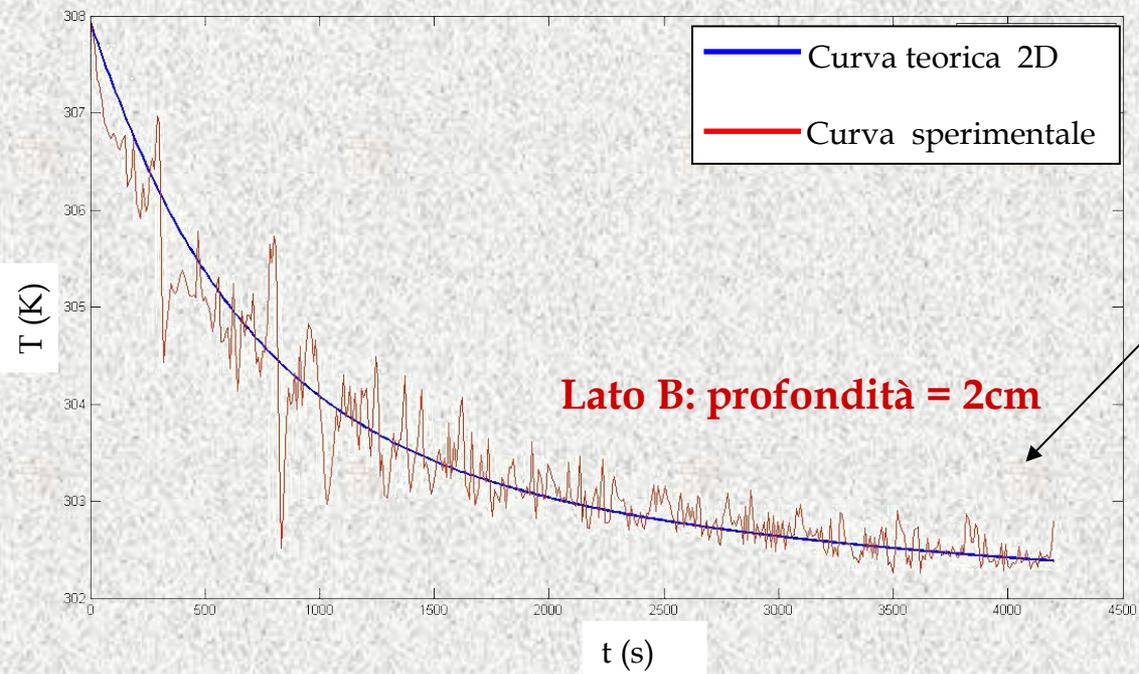
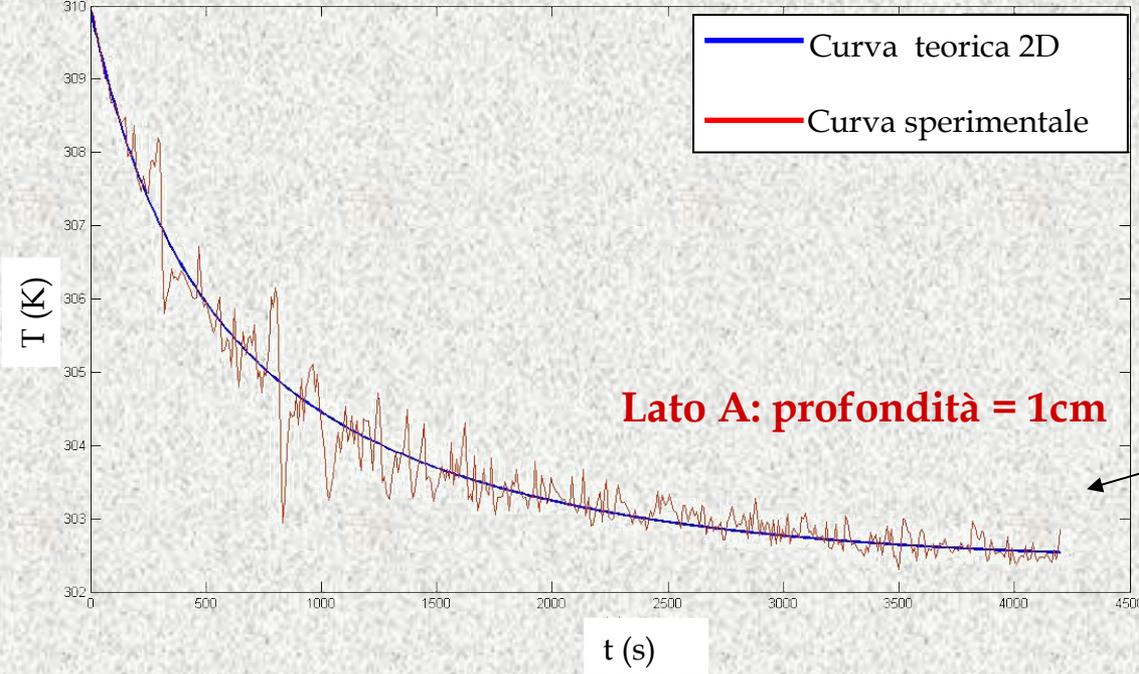
Errore Medio: 0.034%



**Difetto in Sughero;
diametro = 10 cm**

	k	C	ρ
Marmo	2.3	800	2750
Intonaco	0.25	860	1600
Sughero	0.08	1760	480

Errore Medio: 0.011%



**Difetto in Plastica;
diametro = 10 cm**

	k	C	ρ
Marmo	2.3	800	2750
Intonaco	0.25	860	1600
Plastica	0.16	1480	1350

Errore Medio: 0.006%

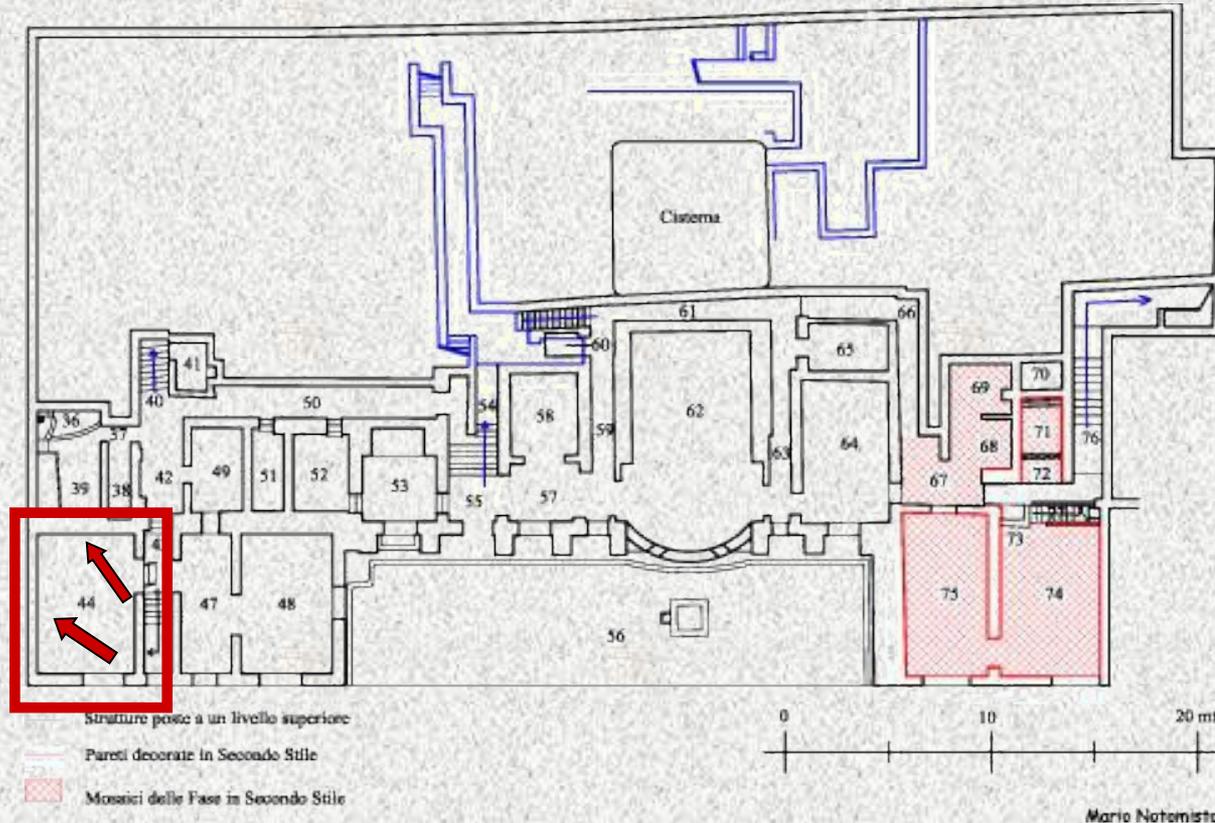
Applicazione dei codici numerici a
misure termografiche di sito



Caratterizzazione di Strutture Murarie e di
Eventuali Zone di Degrado

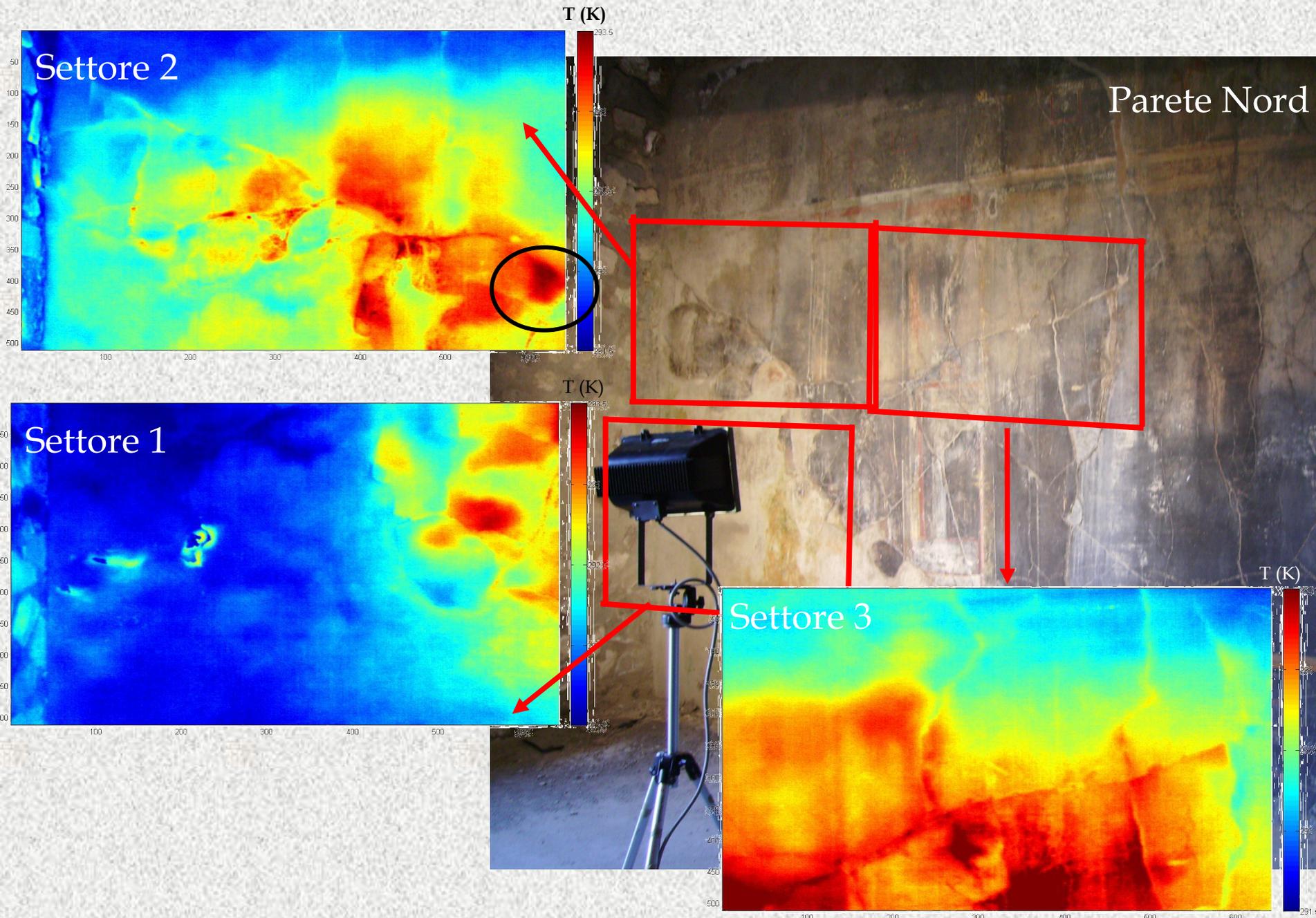
Casa di M.F. Rufo (Pompei)

NORD
←



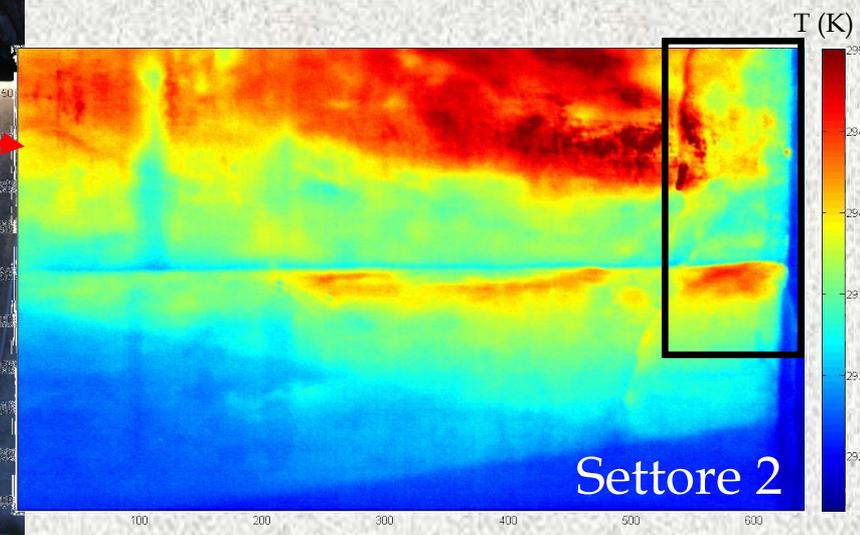
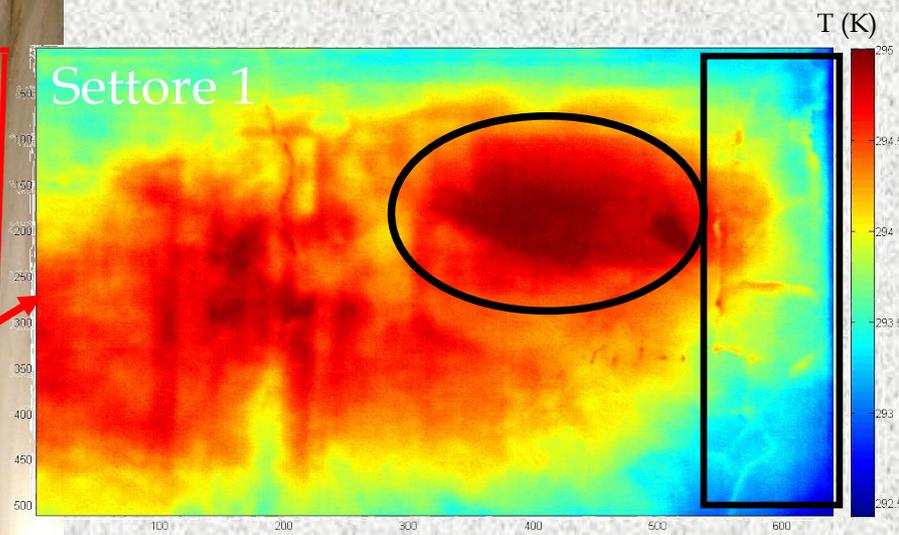
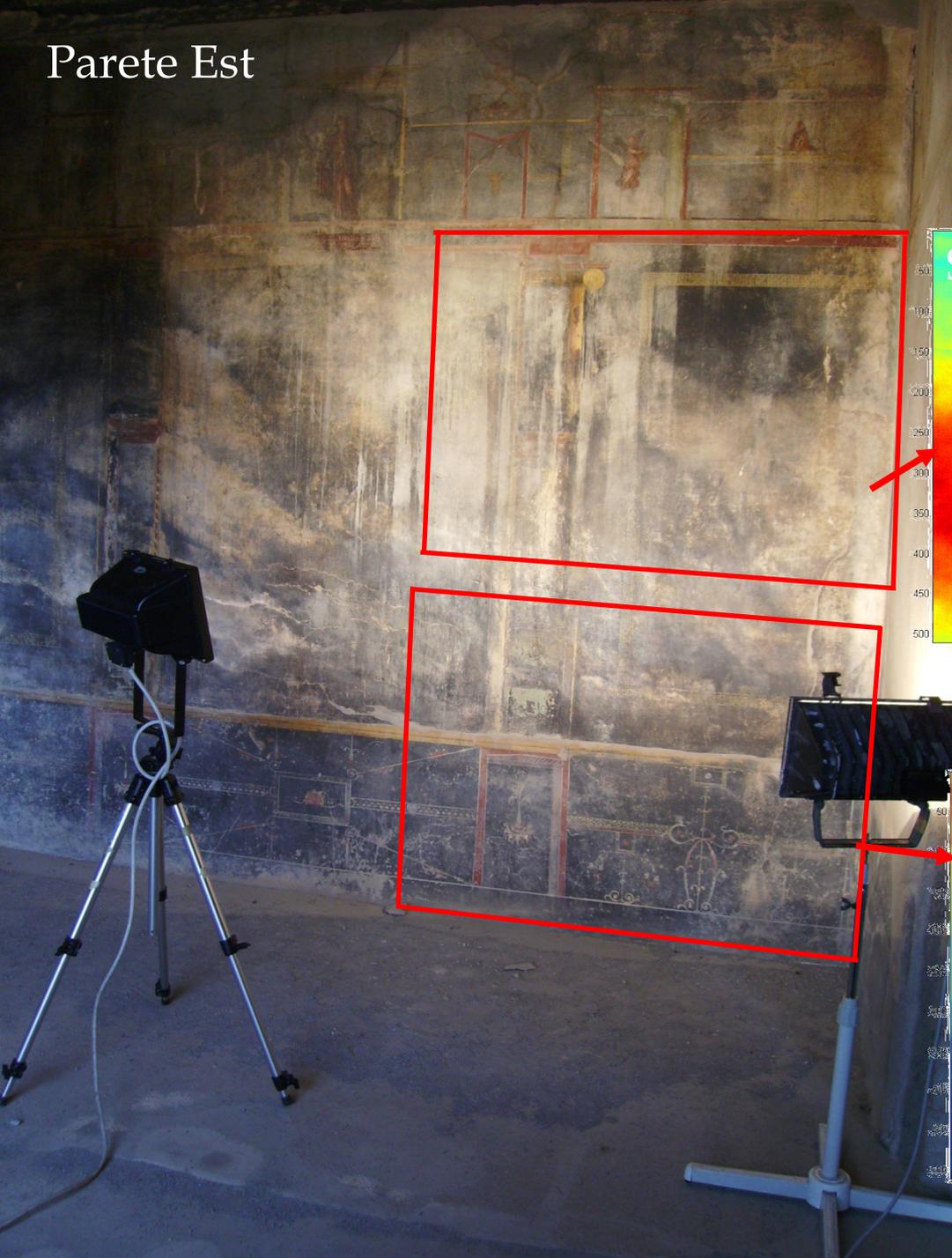
Provata la validità dei codici numerici su una struttura nota, essi sono stati applicati a dati termografici acquisiti attraverso indagini di sito, condotte su due pareti interne della Casa di Marco Fabio Rufo, situata nell'area archeologica di Pompei. A causa delle dimensioni delle due pareti, e della conseguente impossibilità di inquadrarle totalmente attraverso un unico rilievo termografico, ciascuna di esse è stata suddivisa in differenti settori e, per ognuno di tali settori, è stata acquisita una sequenza di immagini termiche (con un intervallo temporale costante, pari a 10 s) sia nella fase di adduzione del calore, sia nella successiva fase di raffreddamento.

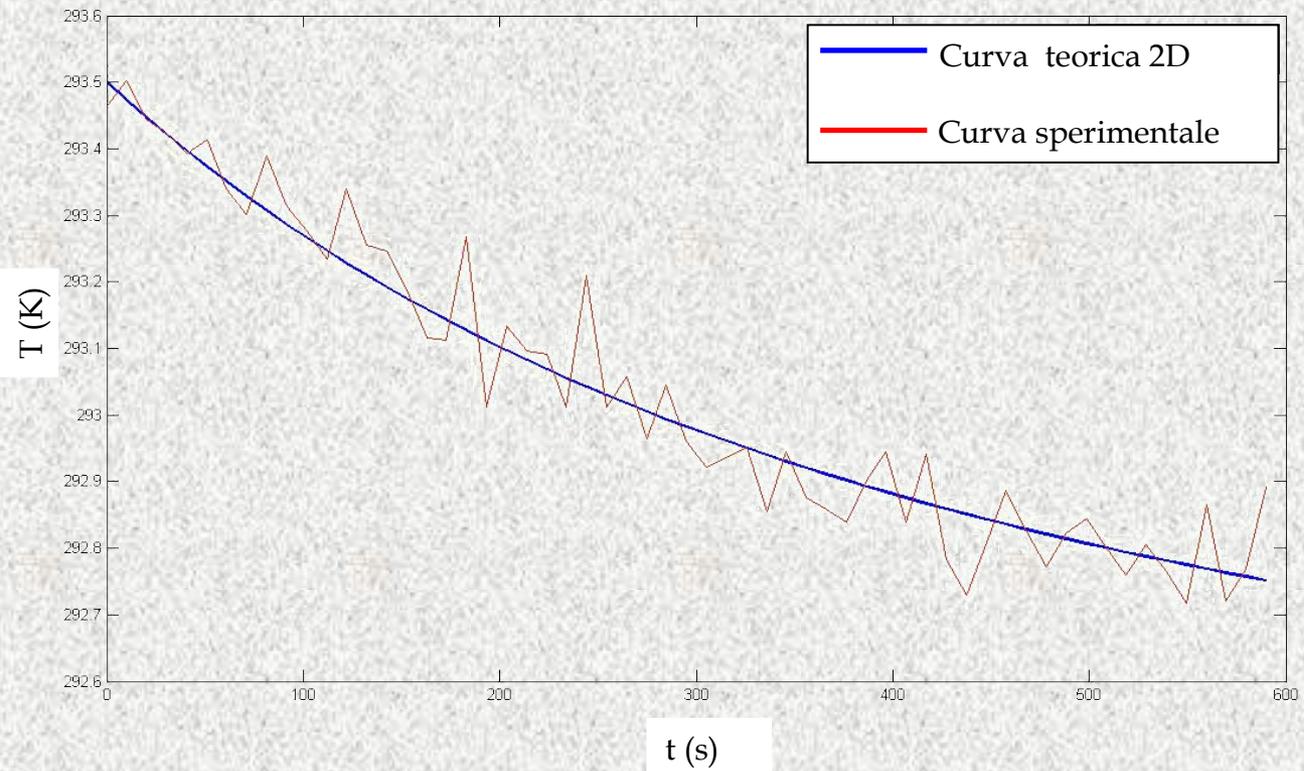
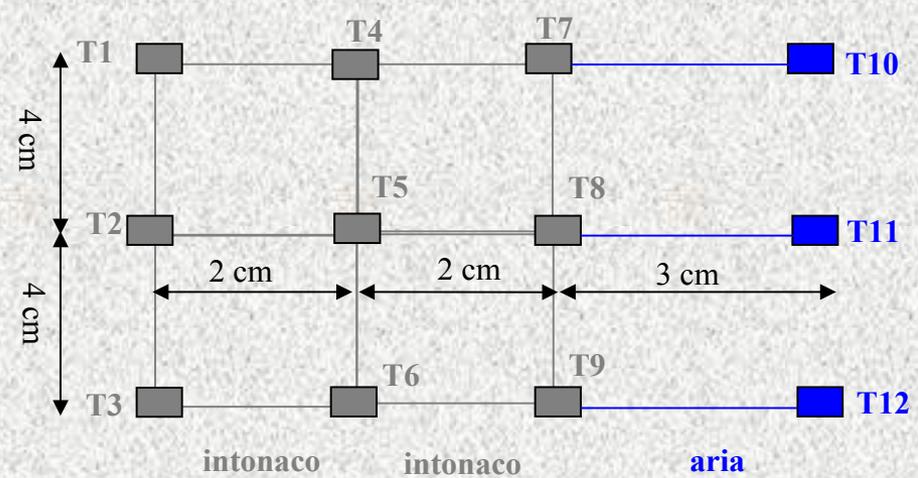
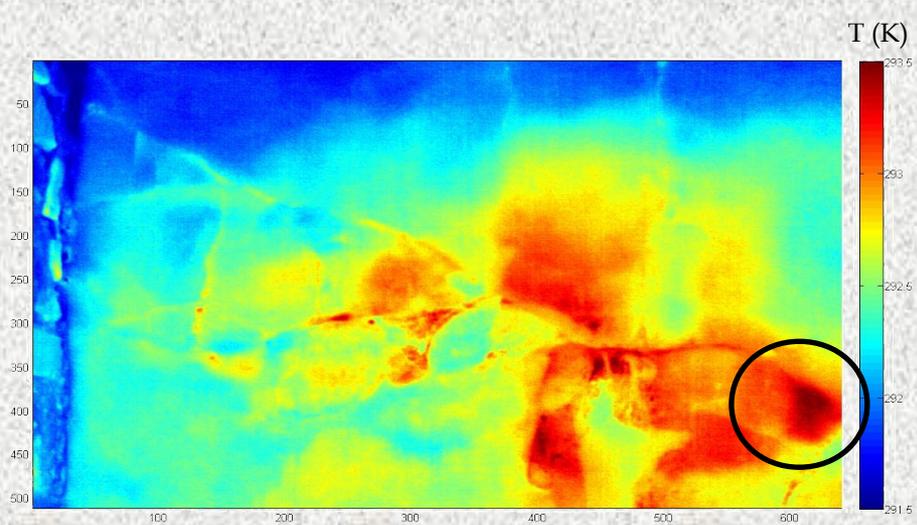
Termogrammi acquisiti alla fine della fase di stimolazione termica per i settori della parete nord.



Parete Est

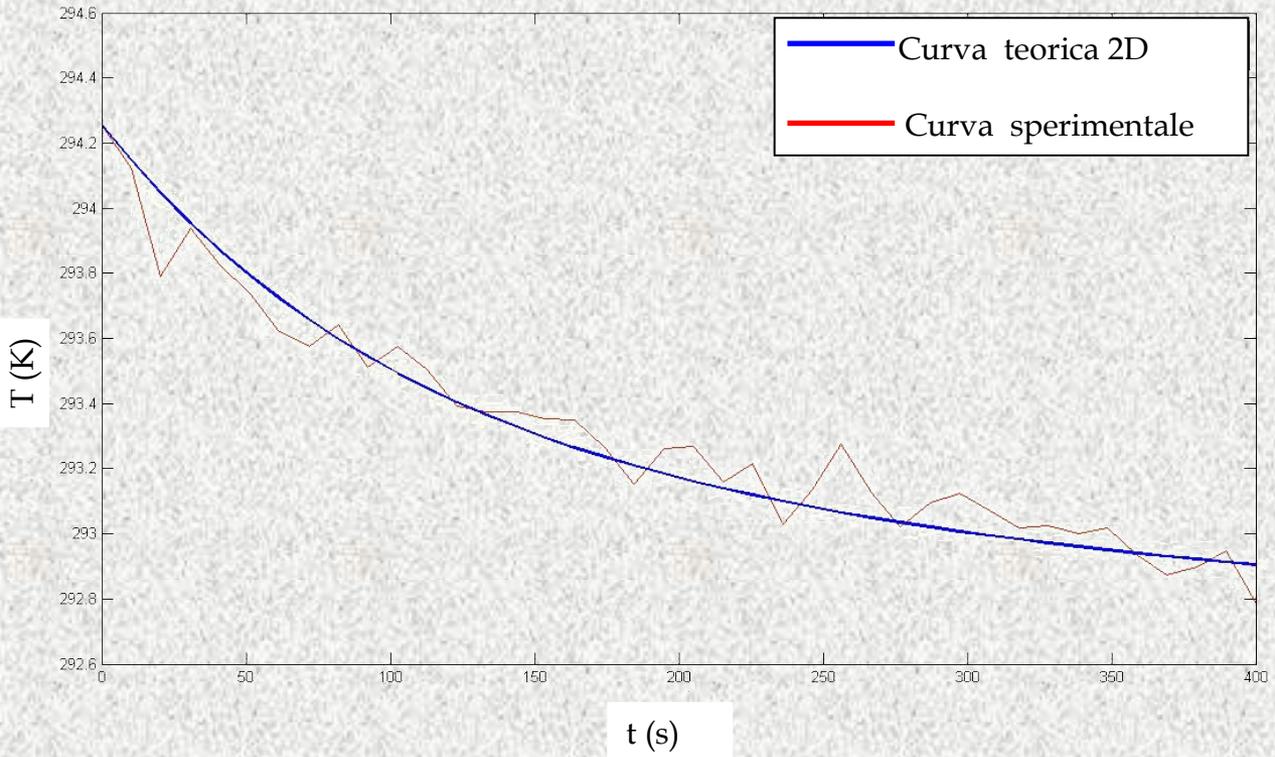
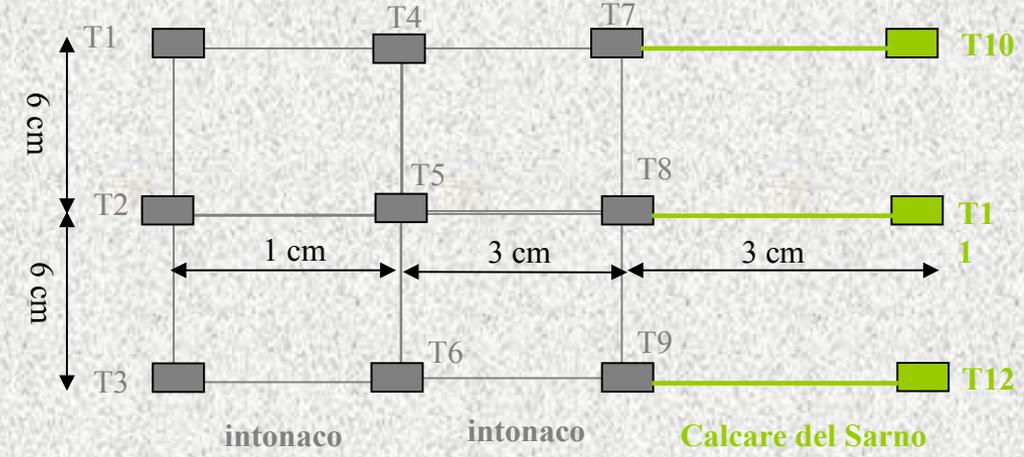
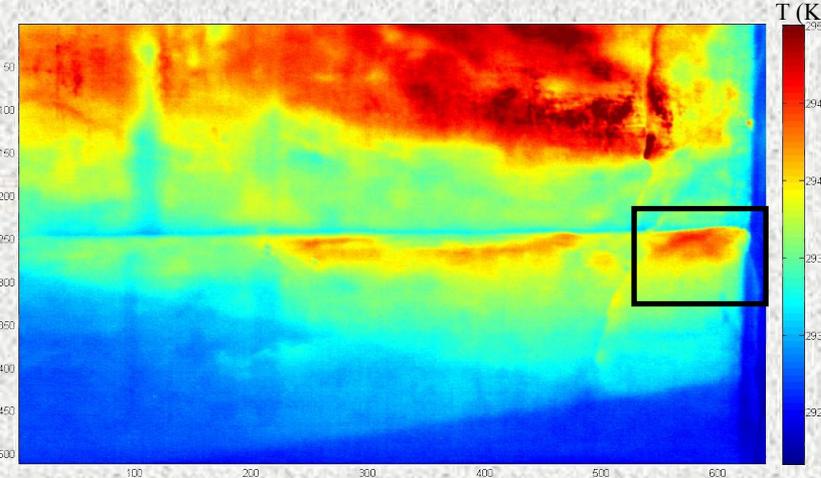
Termogrammi acquisiti alla fine della fase di stimolazione termica per i settori della parete est.





	k	C	ρ
Intonaco	1.1	837	1900
Aria	0.026	1010	1.29

Errore Medio: 0.0065%



	k	C	ρ
Intonaco	1	837	1900
Calcare del Sarno	0.7	900	1500

Errore Medio: 0.0049%

Conclusioni

I codici numerici sviluppati nel presente lavoro di tesi consentono di:

- Valutare lo spessore del rivestimento di intonaco
- Individuare il tipo di struttura muraria presente al di sotto del rivestimento
- Individuare e caratterizzare difetti ascrivibili a cause di degrado della struttura