

CAPITOLO 3: ANALISI SPERIMENTALE

Il lavoro qui presentato si inserisce nel contesto del progetto di ricerca sperimentale interuniversitario denominato “CNT-APPs” (Charge Neutralization Technology Applications), promosso con l’obiettivo di studiare e validare l’efficacia di tecnologie innovative per la mitigazione dell’umidità da risalita capillare nelle murature, con particolare attenzione agli edifici storici. Tale iniziativa, frutto della sinergia tra numerosi atenei italiani e partner industriali, è coordinata da un comitato scientifico composto da rappresentanti dell’Università degli Studi della Basilicata, dell’Università degli Studi di Ferrara, dell’Università degli Studi di Napoli “Federico II”, dell’Università degli Studi di Padova, dell’Università del Salento e del Politecnico di Torino. Il progetto è attuato in collaborazione con le aziende Domodry S.r.l. e Leonardo Solutions S.r.l., le quali hanno fornito il supporto tecnico e operativo necessario allo sviluppo delle sperimentazioni (Figura 3.1).

Il progetto CNT-APPs si propone di superare i limiti delle tradizionali tecniche di deumidificazione muraria, attraverso l’impiego di un sistema di cui si è introdotto il funzionamento al Capitolo 2. In tale ambito, l’attività sperimentale descritta in questo capitolo rappresenta un contributo significativo allo studio delle prestazioni del sistema CNT, mediante analisi condotte in situ e in laboratorio, finalizzate alla valutazione dell’efficacia dell’intervento. Il coinvolgimento attivo delle istituzioni accademiche consente inoltre una rigorosa validazione scientifica, assicurando il confronto tra i risultati ottenuti e i riferimenti normativi e bibliografici nazionali e internazionali.



Figura 4.1: Progetto di ricerca interuniversitario “CNT-APPs” (www.cnt-apps.com).

Scopo primario del presente lavoro è l’ottimizzazione di un protocollo di indagine termografica, precedentemente sviluppato in ambito accademico (Venturi, 2020), volto alla valutazione dell’efficienza della tecnologia elettrofisica basata sulla neutralizzazione della carica elettrica. In tale ambito, il contributo sperimentale si è avvalso della documentazione tecnica fornita dal gruppo Leonardo Solutions – Domodry, che ha messo a disposizione report dettagliati relativi all’installazione e al monitoraggio di più interventi effettuati con il sistema CNT®. Tali casi studio, selezionati in base alla loro rappresentatività, hanno visto l’attivazione del dispositivo per un periodo continuativo di almeno due anni, condizione necessaria per una valutazione affidabile della sua efficacia nel contrasto all’umidità da risalita capillare.

3.1 PROCEDURA AUTOMATICA DI ELABORAZIONE

La seguente sezione descrive il funzionamento della procedura automatizzata di analisi sviluppata da R. Venturi (2020) e ripresa in questo contesto sperimentale per il trattamento delle immagini termografiche fornite dall'azienda partner. Al fine di standardizzare il processo di elaborazione delle matrici di dati termografici, si è scelto di ricorrere alla piattaforma Matlab, linguaggio ampiamente utilizzato in ambito tecnico-scientifico per la creazione di algoritmi, l'elaborazione numerica e la visualizzazione di dati sperimentali. Tale strumento risulta particolarmente efficace nella gestione di grandi moli di dati, offrendo un ambiente flessibile e modulare per l'implementazione di codici dedicati.

Nel contesto del presente lavoro, i file utilizzati all'interno dell'ambiente Matlab sono in formato “.m” e comunemente indicati come M-files. Questi possono assumere due forme principali:

- *Scripts*: file contenenti sequenze di comandi che agiscono direttamente sulle variabili presenti nel Workspace, ma che non prevedono l'utilizzo di input o output espliciti.
- *Functions*: moduli programmabili che, a differenza degli script, sono dotati di input e output definiti e utilizzano variabili locali, rendendoli più adatti per strutturare in modo modulare e riutilizzabile le operazioni di calcolo.

Nel quadro delle analisi eseguite, è stata predisposta una function dedicata alla generazione automatica delle termografie, all'estrazione dei valori numerici dalla matrice termica e alla produzione dei grafici relativi ai parametri di interesse. A supporto di tale procedura, sono stati sviluppati anche degli script volti alla gestione dei dati e all'elaborazione grafica finale.

3.1.1 Importazione della termografia

Le immagini termografiche, alla base del processo analitico, sono costituite da una matrice di dati numerici in cui ogni elemento, o “pixel”, rappresenta un punto dell'immagine ed è associato a un valore specifico di temperatura. La quantità di pixel varia in funzione della risoluzione del dispositivo utilizzato: si va da immagini più contenute (es. 160×120 pixel) fino a termografie ad alta definizione che possono superare il milione di punti, come nel caso delle matrici da 1280×960 pixel.

Per poter elaborare questi dati in ambiente Matlab, è necessario convertire l'immagine termografica in un formato compatibile, solitamente “.csv” o “.txt”, generando così un file numerico (.mat) a seguito del caricamento nel programma. Questo file contiene la matrice completa dei valori di temperatura, organizzata in m righe e n colonne, corrispondenti rispettivamente all'altezza e alla larghezza dell'immagine (Figura 3.2). La termografia importata può così essere trattata come una matrice numerica, pronta per le successive operazioni di analisi tramite script o function specifiche all'interno del software.

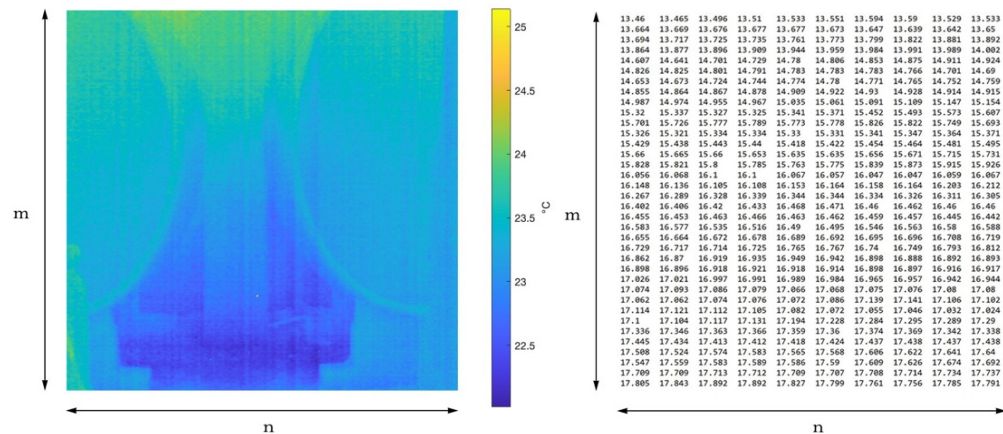


Figura 3.2: Esempio di termografia con risoluzione $n \times m$ (a sinistra) associata ad una matrice numerica con n righe ed m colonne (a destra).

La specifica Function utilizzata per la creazione della termografia in Matlab, a partire dalla matrice numerica, è quella riportata in Figura 3.3. Una volta caricata la matrice numerica, sarà sufficiente digitare nel Command Window il nome della function “CreateFigure(“nome della matrice numerica”)” con indicato tra parentesi il nome utilizzato. Al fine di caricare in Matlab l’immagine generata della termografia, utilizzo lo Script in Figura 3.4.

```
% Function per la generazione della termografia
function createfigure(termografia)
% CREATEFIGURE1(termografia)

% Create axes
axes1 = axes('Units','Centimeters','Parent',figure);
hold(axes1,'on');

% Create surf
surf(termografia,'Parent',axes1,'EdgeColor','none');
view(axes1,[-180 90]);

% Create grid
grid(axes1,'on');

% Create colorbar
c=colorbar(axes1);
c.Label.String='°C';
```

Figura 3.3: Function per la generazione della termografia.

```
% Caricamento della termografia pre intervento
load('termografia.mat');
IR1_R=termografia;

% Rotazione termografia di 90°
IR=rot90(IR_R);

% Plot della termografia
createfigure(IR);
title('Termografia');
```

Figura 3.4: Script per il caricamento della termografia.

3.1.2 Ritaglio della termografia

Una fase preliminare cruciale nell'elaborazione dei dati termografici consiste nell'individuazione e selezione dell'area di interesse, da cui vengono esclusi tutti quegli elementi che potrebbero introdurre imprecisioni nell'analisi, come oggetti d'arredo, vegetazione, o ostacoli temporanei. Questo passaggio, noto come ritaglio della termografia, consente di isolare esclusivamente la porzione di muratura da esaminare, garantendo così una lettura più affidabile dei dati rilevati.

Il principale beneficio derivante da questa operazione è la possibilità di analizzare un'intera superficie piuttosto che un semplice profilo verticale di temperatura. Ciò permette di condurre una valutazione più estesa, riducendo il rischio di errori localizzati e offrendo una maggiore comprensione del comportamento termico dell'elemento edilizio. In particolare, questo approccio consente anche l'analisi dei gradienti termici orizzontali, rivelatisi utili per interpretare le variazioni legate all'umidità e ad altri fattori ambientali. Per rendere il procedimento adattabile alle diverse esigenze, è stata implementata una finestra di input che consente all'utente di specificare manualmente i valori di ascissa e ordinata che delimitano l'area da esaminare. L'utente può così selezionare direttamente le coordinate minime e massime in corrispondenza degli assi cartesiani dell'immagine (Figura 3.5), ottenendo un controllo diretto e preciso sull'estensione dell'analisi.

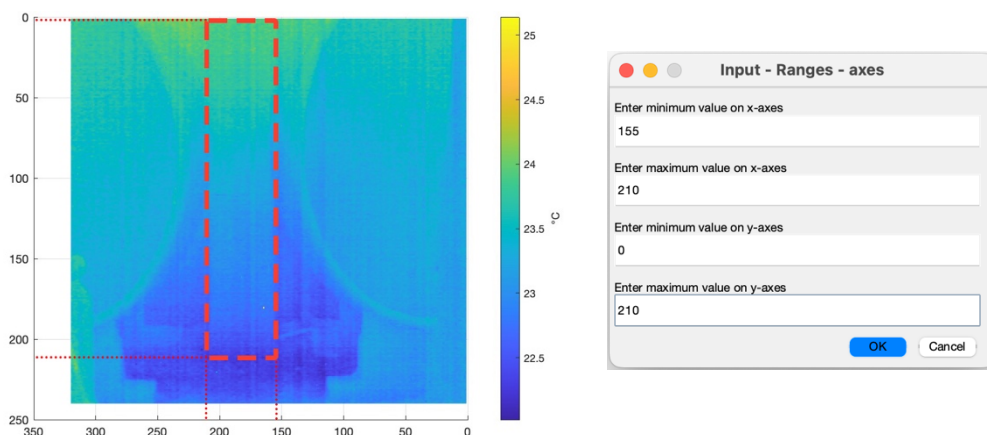


Figura 3.5: Esempio di ritaglio di una termografia (a sinistra) e relativa finestra di input per l'inserimento dei valori (a destra).

```
% Creazione finestra dialogo di input
prompt={'Enter minimum value on x-axes',...
        'Enter maximum value on x-axes',...
        'Enter minimum value on y-axes',...
        'Enter maximum value on y-axes'};
dlgtitle='Input - Ranges - axes';
dims=[1 60];
definput={'min x','max x','min y','max y'};
answer=inputdlg(prompt,dlgtitle,dims,definput);
xi=str2num(answer{1})+1;
xf=str2num(answer{2});
yi=str2num(answer{3})+1;
yf=str2num(answer{4});

% Ritaglio della termografia
subIR=(IR(yi:yf,xi:xf));
createfigure(subIR);
```

Figura 3.6: Script per la selezione dell'area da indagare.

Lo script utilizzato per la selezione dell'area da indagare è riportato in Figura 3.6. Sarà sufficiente far partire tale codice attraverso il comando “Run” per far apparire la finestra di Prompt in cui inserire i limiti per il ritaglio. Una volta inseriti tali valori, otterrò la termografia ritagliata.

3.1.3 Calibrazione dell'immagine

Per mettere in relazione i dati termografici con le reali dimensioni fisiche della muratura oggetto di studio, è stato necessario introdurre un parametro di scala, detto fattore di calibrazione. Questo valore si ottiene dal rapporto tra la distanza misurata in pixel sull'immagine e la corrispondente distanza reale espressa in centimetri:

$$calibrationFactor = \frac{distanceInPixel}{distanceInCm} \quad (3.1)$$

Tale parametro risulta fondamentale per tradurre le misure digitali in valori fisici significativi, come ad esempio l'andamento dei gradienti termici. Tuttavia, questo metodo è efficace solo nel caso in cui l'inquadratura della termocamera risulti perpendicolare alla superficie indagata. In presenza di angolazioni oblique o distorsioni prospettiche, la sua applicabilità si riduce notevolmente.

In parallelo, è considerato cruciale attenersi ad un sistema standard per l'acquisizione delle immagini in situ, così da garantire coerenza nei dati raccolti. Come per altri passaggi del flusso di lavoro, è stata implementata una finestra di input che consente all'utente di specificare direttamente i valori di riferimento in pixel e centimetri da utilizzare per la calibrazione (Figura 3.7).

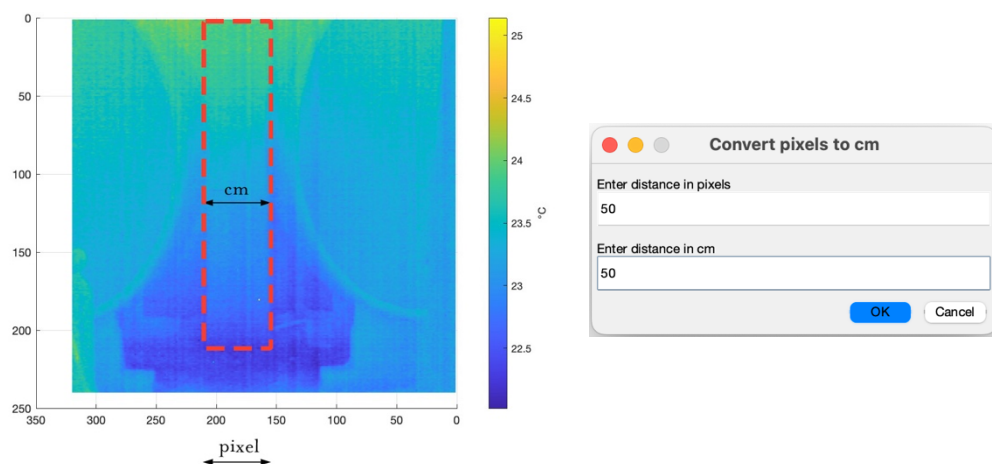


Figura 3.5: Esempio di conversione da pixel a centimetri (a sinistra) con relativa finestra di input per l'inserimento dei dati (a destra).

Per determinare con precisione il fattore di scala, si è fatto riferimento a elementi geometrici noti presenti nelle planimetrie, come aperture di porte o finestre, colonne o

altri dettagli architettonici. In assenza di elementi affidabili nella scena, si è proceduto ipotizzando dimensioni standard o sulla base di oggetti di uso comune.

Questa procedura permette non solo di rappresentare graficamente l'andamento della temperatura in scala reale, ma anche di evitare errori dovuti all'utilizzo di termocamere differenti con risoluzioni variabili. L'assenza di tale procedura di calibrazione porterebbe a risultati non direttamente confrontabili tra loro (nel caso, per esempio, in cui si dispongano di termografie indagate con termocamere a diversa risoluzione).

Infine, per migliorare ulteriormente la precisione delle misure, si suggerisce durante l'acquisizione in sito di applicare sull'elemento murario uno o più marker riflettenti, come strisce in carta d'alluminio, collocati a distanze note. Questi riferimenti risultano facilmente visibili nei termogrammi, agevolando così il riconoscimento delle scale metriche e contribuendo alla correzione di eventuali deformazioni prospettiche.

Si riporta in Figura 3.8 lo specifico Script utilizzato per la fase di calibrazione. Analogamente al caso precedente, sarà sufficiente far partire tale codice attraverso il comando "Run" per far apparire la finestra di Prompt in cui inserire le distanze in pixel e in cm.

```
% Conversione da pixel a cm
prompt={'Enter distance in pixels','Enter distance in cm'};
dlgtitle='Convert pixels to cm';
dims=[1 60];
definput={'pixels','cm'};
answer=inputdlg(prompt,dlgtitle,dims,definput);
distanceInPixel=str2num(answer{1});
distanceInCm=str2num(answer{2});
calibrationFactor=distanceInPixel/distanceInCm;
```

Figura 3.8: Script per la calibrazione della termografia.

3.1.4 Grafico della temperatura dei profili verticali

Dopo aver selezionato e ritagliato l'area d'interesse della termografia, si procede con l'elaborazione del profilo termico lungo la direzione verticale. Per ogni colonna della matrice termografica, viene calcolata la temperatura media μ e la relativa deviazione standard¹⁷ $\pm 2\sigma$, al fine di rappresentare l'andamento termico su tutta l'altezza dell'immagine.

Nel sistema di riferimento adottato, l'asse delle ordinate (Y) rappresenta l'altezza in centimetri, partendo dall'alto verso il basso, mentre l'asse delle ascisse (X) è associato alle diverse colonne dell'immagine, lette da destra verso sinistra. Nel caso illustrato in Figura 3.9, l'elaborazione è stata condotta su una fascia verticale larga circa 55 cm, da cui è stato estratto il profilo termico medio.

L'analisi ottenuta mostra una temperatura media attorno ai 23 °C, con variazioni significative tra la base e la sommità della sezione muraria, attribuibili alla presenza di umidità differenziata. In particolare, si osserva un incremento della temperatura nelle zone superiori, con scostamenti rilevanti rispetto alla media, come evidenziato dalla deviazione standard associata.

¹⁷ La deviazione standard è una misura statistica della dispersione o variabilità di un insieme di dati rispetto alla loro media aritmetica. Indica quanto, in media, i valori si discostano dalla media.

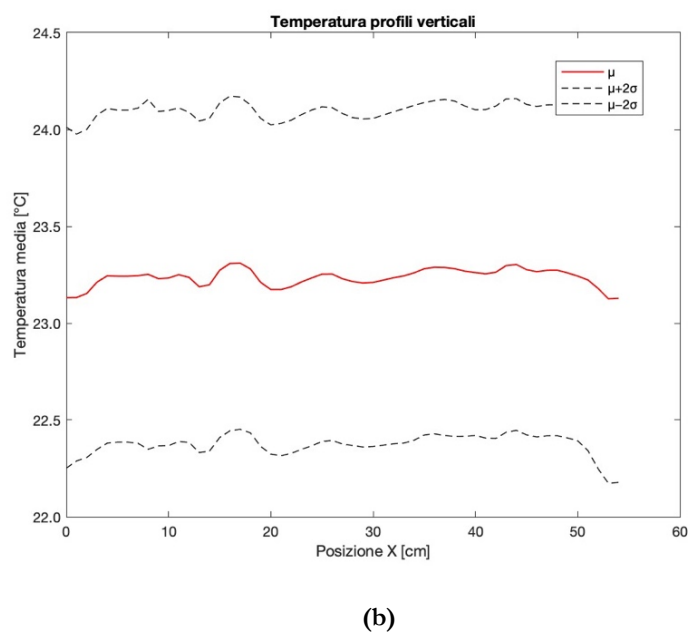
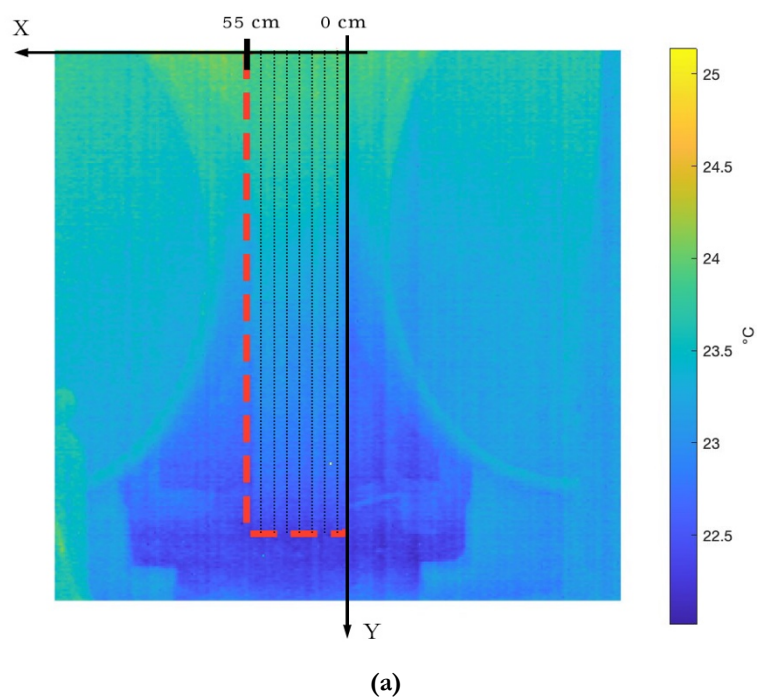


Figura 3.9: Schematizzazione dei profili verticali (a) e grafico relativo all'andamento della temperatura media e deviazione standard di ciascuna colonna della sottomatrice (b).

Lo Script utilizzato per il calcolo della temperatura media e della deviazione standard dei profili verticali e la creazione del relativo grafico è riportato in Figura 3.10.

```

% Media verticale
V_AVG=mean(subIR);

% Deviazione standard verticale
V_dev=std(subIR);

% Media totale sottomatrice
Tot_AVG=mean(subIR,'all');

% Dimensioni sottomatrice
sz=size(subIR);
h_subIR=sz(1);
b_subIR=sz(2);

% Grafico profili verticali
dH=linspace(0,(xf-xi)/calibrationFactor,b_subIR);
figure;
plot(dH,V_AVG,'r','linewidth',0.7);
hold on
plot(dH,V_AVG+2*V_dev,'k--');
hold on
plot(dH,V_AVG-2*V_dev,'k--');
xlabel('Posizione X [cm]');
ylabel('Temperatura media [°C]');
title('Temperatura profili verticali');
legend('\mu','\mu+2\sigma','\mu-2\sigma');
ytickformat('%1f');

```

Figura 3.10: Script per il calcolo della temperatura media dei profili verticali e creazione del relativo grafico.

3.1.5 Grafico della temperatura dei profili orizzontali

Un’analoga procedura è stata adottata per esaminare la distribuzione termica lungo l’asse orizzontale. In questo caso, per ogni riga della matrice termografica viene determinata la temperatura media, calcolando anche la relativa deviazione standard. L’asse delle ascisse (x) rappresenta la distanza orizzontale in centimetri, mentre l’asse delle ordinate (y) indica la temperatura espressa in gradi °C.

Come mostrato nel grafico di Figura 3.11, i risultati ottenuti per la medesima area analizzata nel paragrafo precedente evidenziano una variazione più contenuta lungo il profilo orizzontale rispetto a quello verticale. La temperatura decresce di circa 1,5 °C dai profili collocati in corrispondenza dello zero a quelli posizionati attorno ai 210 cm (come peraltro, era già osservabile dalla Figura 3.9). La deviazione standard risulta notevolmente più bassa, rispetto ai profili verticali, indicando un’ampia uniformità termica lungo la sezione analizzata. Questo comportamento suggerisce una distribuzione più omogenea dell’umidità orizzontalmente, in linea con la dinamica di risalita capillare.

Lo Script utilizzato per il calcolo della temperatura media e della deviazione standard dei profili verticali e la creazione del relativo grafico è riportato in Figura 3.12.

3.1.6 Confronto tra la termografia iniziale e di verifica finale

L’analisi comparativa tra le immagini termografiche acquisite in corrispondenza della fase iniziale e quelle rilevate al termine del periodo di osservazione, consente di valutare l’effetto prodotto dal sistema di deumidificazione sulla distribuzione termica della

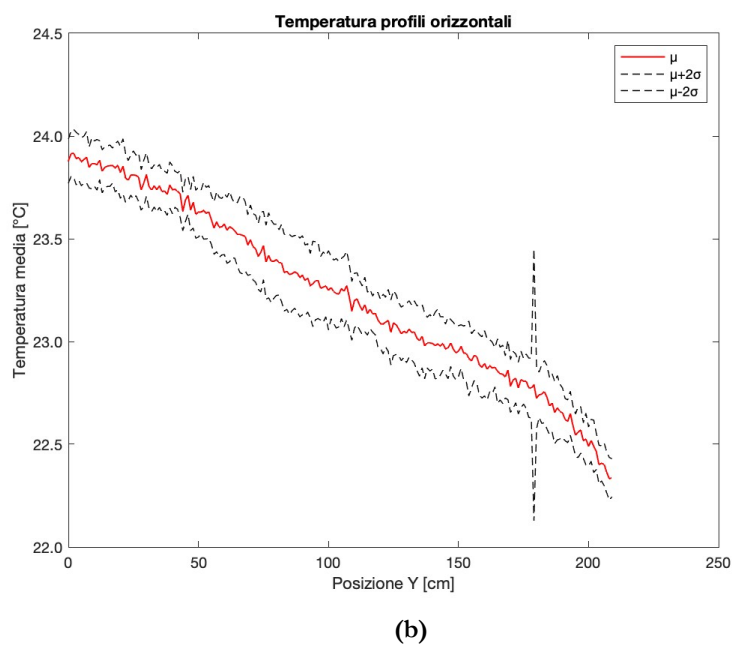
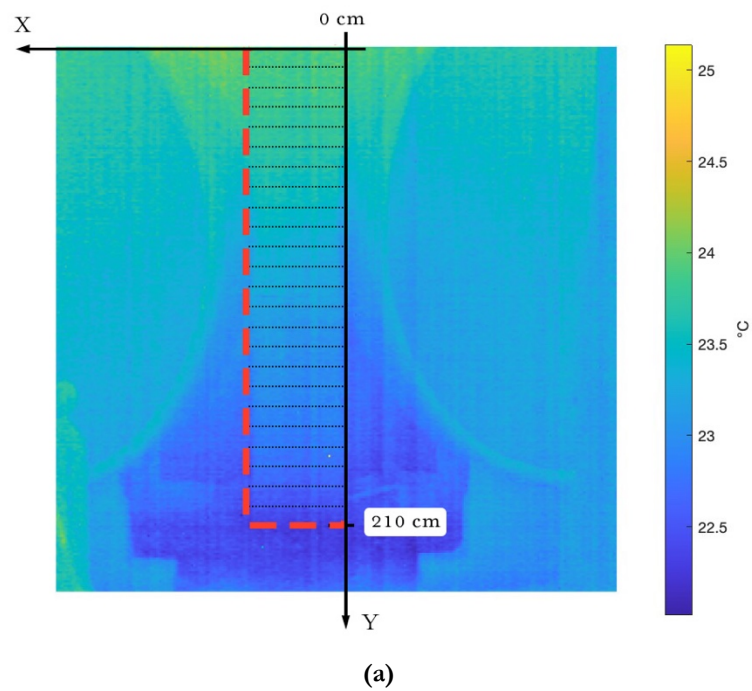


Figura 3.11: Schematizzazione dei profili verticali (a) e grafico relativo all'andamento della temperatura media e deviazione standard di ciascuna colonna della sottomatrice (b).

muratura esaminata. In particolare, sono stati presi in considerazione i dati relativi ai profili verticali e orizzontali, con riferimento alla temperatura media e alla relativa deviazione standard, allo scopo di identificare eventuali variazioni termiche riconducibili alla presenza o all'assenza di umidità da risalita.

```

% Media orizzontale
tsubIR=subIR;
H_AVG=mean(tsubIR);

% Deviazione standard orizzontale
H_dev=std(tsubIR);

% Grafico profili orizzontali
dV=linspace(0,(yf-yi)/calibrationFactor,h_subIR);
figure;
plot(dV,H_AVG,'r','linewidth',0.7);
hold on
plot(dV,H_AVG+2*H_dev,'k--');
hold on
plot(dV,H_AVG-2*H_dev,'k--');
xlabel('Posizione Y [cm]');
ylabel('Temperatura media [°C]');
title('Temperatura profili orizzontali');
legend('\mu', '\mu+2\sigma', '\mu-2\sigma');
ytickformat('%1f');

```

Figura 3.12: Script per il calcolo della temperatura media dei profili orizzontali e creazione del relativo grafico.

Nel caso di studio presentato, la termografia preliminare rappresenta la condizione antecedente all'installazione del dispositivo CNT®, mentre la rilevazione successiva è riferita allo stato finale, al termine di un ciclo operativo continuativo della durata di almeno due anni. Le elaborazioni grafiche riportate, a scopo esemplificativo, nelle Figure 3.13 e 3.14 mostrano, lungo i profili verticali, una scarsa differenza tra le due situazioni: nella fase iniziale è rilevabile un gradiente di temperatura crescente con la quota, associabile alla maggiore presenza di umidità negli strati inferiori; nella fase successiva, la temperatura media decresce progressivamente dalla parte superiore verso la base della parete e la deviazione standard si mantiene significativa, come anche il gradiente di temperatura.

In un caso ideale, al termine dell'intervento, la deviazione standard si ridurrebbe sensibilmente e l'andamento della curva della temperatura dei profili orizzontali risulterebbe stabile su tutta la lunghezza del tratto esaminato, evidenziando la scomparsa dei gradienti termici tipicamente associati alla presenza di umidità.

3.1.7 Normalizzazione della temperatura dei profili orizzontali

Per consentire il confronto tra termografie acquisite in momenti differenti, caratterizzati da condizioni ambientali non omogenee, è stato applicato un processo di normalizzazione delle temperature. Tale operazione prevede la sottrazione, da ciascun valore di temperatura T_i , della media dell'intera area analizzata T_{media} , secondo la relazione:

$$\Delta T = T_i - T_{media} \quad (3.2)$$

Questo tipo di elaborazione consente di annullare gli effetti dovuti a variazioni generali di temperatura ambientale, rendendo il confronto tra termografie più oggettivo e

affidabile. In particolare, il grafico ottenuto dalla normalizzazione dei profili orizzontali evidenzia con maggiore chiarezza la presenza di gradienti significativi, come illustrato nella Figura 3.15. A differenza della semplice analisi della temperatura assoluta (Figura 3.14), i valori risultanti da questa procedura non dipendono dalla temperatura media dell'immagine, ma permettono di mettere in risalto le deviazioni locali rispetto a essa. Nel caso in esame, è immediatamente visualizzabile come la curva del pre-intervento sia rimasta pressoché invariata da quella del post-intervento.

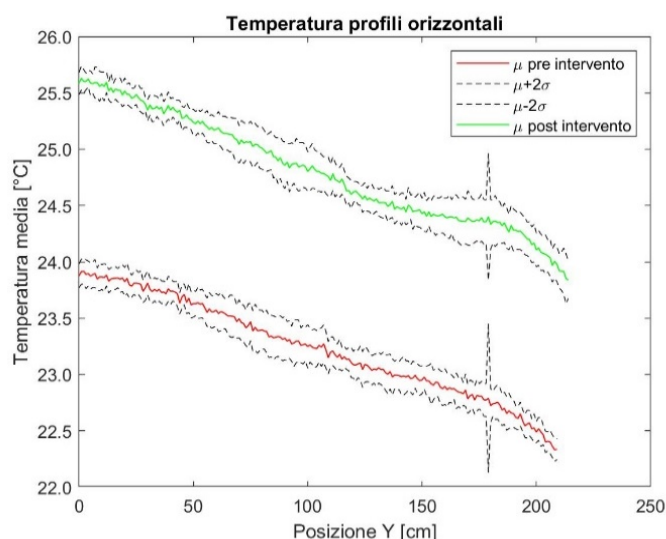


Figura 3.13: Grafico relativo all'andamento della temperatura dei profili orizzontali nei casi di pre e post-intervento.

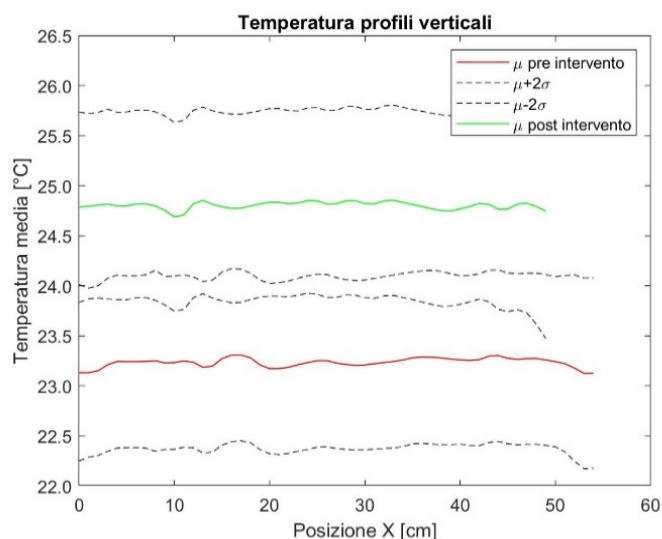


Figura 3.14: Grafico relativo all'andamento della temperatura dei profili verticali nei casi di pre e post-intervento.

Lo Script utilizzato per il calcolo della temperatura media e della deviazione standard dei profili verticali e la creazione del relativo grafico è riportato in Figura 3.16.

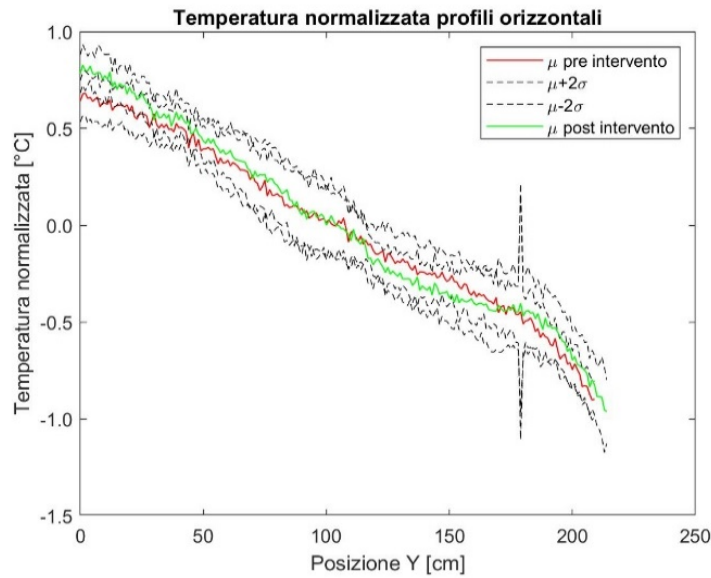


Figura 3.15: Grafico relativo alla normalizzazione della temperatura dei profili orizzontali nei casi di pre e post-intervento.

```
% Temperatura normalizzata profili orizzontali
DH_AVG=H_AVG-Tot_AVG;
figure;
plot(dV,DH_AVG,'r','linewidth',0.7);
hold on
plot(dV,DH_AVG+2*H_dev,'k--');
hold on
plot(dV,DH_AVG-2*H_dev,'k--');
xlabel('Posizione Y [cm]');
ylabel('Temperatura normalizzata [°C]');
title('Temperatura normalizzata profili orizzontali');
legend('\mu','\mu+2\sigma','\mu-2\sigma');
ytickformat('%1f');
```

Figura 3.16: Script per la normalizzazione della temperatura dei profili orizzontali.

3.1.8 Calcolo di ratioD

Per ottenere una valutazione sintetica dell'eventuale presenza di un gradiente verticale riconducibile all'umidità di risalita, è stato definito un indicatore numerico denominato *ratioD*, calcolato come rapporto tra la deviazione standard delle temperature lungo i profili verticali σ_V e quella relativa ai profili orizzontali σ_H :

$$\text{ratioD} = \frac{\sigma_V}{\sigma_H} \quad (3.3)$$

L'impiego di questo indice consente di distinguere le fluttuazioni termiche attribuibili all'umidità da quelle derivanti da altre fonti. In particolare:

- Se $\text{ratioD} \approx 1$, si rileva una distribuzione uniforme della temperatura nella sottosezione analizzata, oppure un gradiente orizzontale paragonabile a quello verticale;
- Se $\text{ratioD} > 1$, è presente un gradiente verticale significativo, con alta probabilità associato a umidità di risalita;
- Se $\text{ratioD} < 1$, la variazione è prevalentemente orizzontale.

L'indice è stato applicato sia alle termografie preliminari sia a quelle post-intervento. Nel presente caso, i valori ottenuti confermano la sostanziale permanenza della situazione: i valori di ratioD rimangono maggiori di 1 e pressoché costanti prima e dopo l'intervento.

3.1.9 Calcolo di ΔD

Per rafforzare ulteriormente l'analisi, è stato introdotto un secondo parametro, indicato come ΔD , definito come la differenza tra la deviazione standard lungo i profili verticali e quella lungo i profili orizzontali:

$$\Delta D = \sigma_V - \sigma_H \quad (3.4)$$

A differenza del rapporto ratioD , che restituisce un valore relativo, questo parametro esprime in termini assoluti la maggiore o minore dispersione termica lungo la direzione verticale rispetto a quella orizzontale. La sua introduzione consente di cogliere più agevolmente eventuali anomalie localizzate, anche quando le variazioni non seguano una proporzione lineare.

Valori di ΔD prossimi allo zero indicano una sostanziale omogeneità nella distribuzione delle temperature tra le direzioni verticale e orizzontale. In tali condizioni, non si rileva alcun predominio di variabilità termica lungo l'asse verticale, suggerendo l'assenza di effetti riconducibili all'umidità da risalita. Al contrario, scostamenti significativi da zero segnalano un disallineamento tra le due componenti, con probabile presenza di un gradiente verticale legato alla risalita capillare.

L'indice ΔD è stato calcolato sia per le immagini termiche acquisite prima dell'intervento sia per quelle successive, al fine di confermare l'efficacia dell'azione di deumidificazione e supportare, con un ulteriore parametro, la diagnosi tecnica sul comportamento igrotermico della muratura.

3.1.10 Interpolazione lineare della temperatura dei profili orizzontali

Tra le fasi finali dell'elaborazione dei dati termografici è stata inclusa la costruzione di una retta interpolante per i profili orizzontali di temperatura, al fine di quantificare con maggiore precisione l'andamento del gradiente termico¹⁸. Il metodo prevede il calcolo del coefficiente angolare m della retta che meglio approssima, in senso lineare, i valori di temperatura lungo la direzione orizzontale dell'immagine.

¹⁸ Si rimanda al Capitolo 4 sull'Elaborazione dei risultati per la definizione del gradiente di temperatura sopra citato.

Il coefficiente μ costituisce un indicatore sintetico del gradiente termico, utile per confrontare in modo diretto la situazione termica antecedente all'intervento con quella osservata successivamente. Nel contesto dell'umidità da risalita, un valore medio di pendenza significativamente diverso da zero può essere associato alla presenza di un'anomalia termica dovuta all'umidità nei livelli inferiori della muratura. Il confronto dei valori ottenuti in differenti condizioni consente di verificare eventuali miglioramenti nella distribuzione termica dell'elemento edilizio analizzato.

Si riportano nelle Figure 3.17 e 3.18 l'esempio di una retta di interpolazione della temperatura dei profili orizzontali e lo script utilizzato per questa fase del processo di analisi.

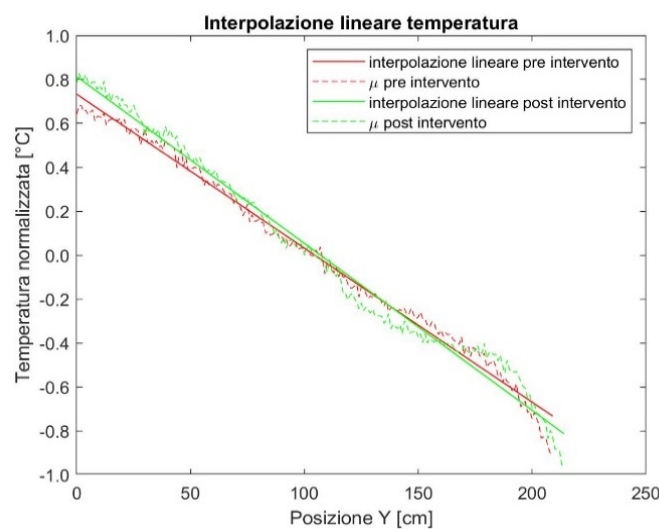


Figura 3.17: Grafico relativo all'interpolazione lineare delle temperature dei profili orizzontali nei casi di pre e post-intervento.

```
% Interpolazione lineare dei dati
figure;
T_int=polyfit(dV,DH_AVG,1);
r_int=T_int(2)+T_int(1)*dV;
plot(dV,r_int,'r','linewidth',0.7)
hold on
plot(dV,DH_AVG,'r--')
xlabel('Posizione Y [cm]');
ylabel('Temperatura normalizzata [°C]');
title('Interpolazione lineare temperatura');
legend('interpolazione lineare','\mu');
ytickformat('%.1f')
```

Figura 3.18: Script per la definizione della retta di interpolazione lineare delle temperature dei profili orizzontali.

3.1.11 Correzione della palette cromatica

Ai fini di un confronto coerente tra le immagini termografiche acquisite prima e dopo l'installazione del sistema di deumidificazione, si è reso necessario un intervento di

correzione della palette cromatica, con l'obiettivo di rendere le immagini più facilmente leggibili e visivamente confrontabili. Tale operazione agisce esclusivamente sul piano della rappresentazione grafica e non modifica in alcun modo i risultati quantitativi ottenuti, come l'indice RatioD, il ΔD , il coefficiente angolare m o il valore del gradiente termico.

Affinché il confronto tra immagini sia visivamente corretto, è fondamentale che la differenza tra il valore massimo e minimo della temperatura rappresentata nella palette cromatica rientri in un medesimo intervallo, così da limitare le incertezze legate a condizioni ambientali differenti al momento dell'acquisizione. L'informazione termica di ciascuna immagine è infatti espressa attraverso una scala di colori dipendente dal range selezionato, il cui valore medio può variare sensibilmente da un'immagine all'altra, in funzione delle caratteristiche dell'ambiente circostante. Poiché la distribuzione cromatica non è associata agli assi cartesiani o a riferimenti grafici esterni, ma unicamente ai limiti scelti per la mappa termica, un confronto tra immagini non normalizzate può risultare fuorviante.

Le termografie fornite dall'azienda, infatti, possono presentare scale cromatiche non omogenee, determinate automaticamente sulla base dell'intero intervallo di temperature dell'immagine, includendo anche elementi estranei all'area oggetto di studio (ad esempio arredi o superfici marginali). In tali casi, la scala cromatica risulta influenzata da componenti non pertinenti, compromettendo la coerenza visiva e introducendo potenziali ambiguità interpretative nel confronto tra immagini pre e post-intervento.

Per ovviare a tali criticità, è stata effettuata una ricalibrazione delle immagini termografiche attraverso la funzione “*Colormap Editor*” di Matlab, intervenendo direttamente sulla scala cromatica della porzione ritagliata e realmente indagata. L'intervallo termico è stato centrato attorno al valore medio della temperatura locale, definendo un range simmetrico (± 1 °C, $\pm 1,5$ °C o ± 2 °C) in funzione dell'intensità del gradiente termico rilevato. Questa operazione è stata applicata in modo sistematico sia alle immagini preliminari sia a quelle successive alla verifica, garantendo una rappresentazione visiva più omogenea e confrontabile.

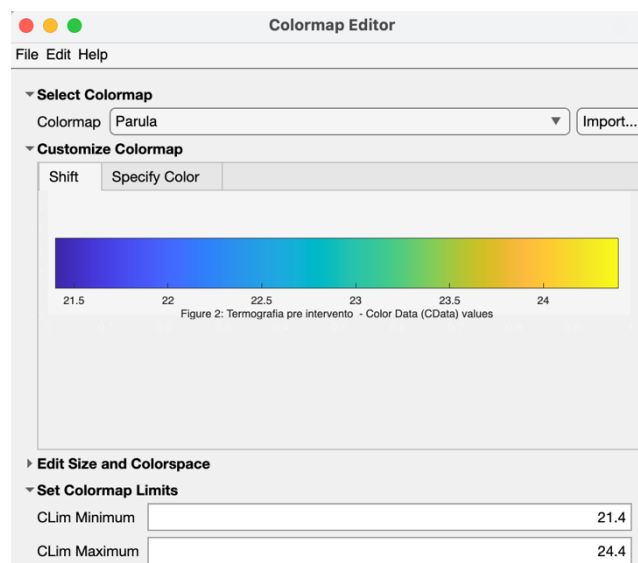


Figura 3.19: Strumento “Colormap Editor” di Matlab che permette la correzione della palette cromatica.