

# Università degli Studi di Ferrara

DOTTORATO DI RICERCA IN  
"SCIENZE DELL'INGEGNERIA"

CICLO XXVI

COORDINATORE Prof. TRILLO STEFANO

**L'identificazione e il rilievo geometrico delle tipologie costruttive al di sotto degli intonaci, mediante una tecnica low cost basata sull'uso integrato della termografia e della fotogrammetria digitale.**

Settore Scientifico Disciplinare ICAR/06

**Dottorando**

Dott. SOLA ROSSELLA

*(firma)*

**Tutore**

Prof. RUSSO PAOLO

*(firma)*

Anni 2011/2013



## **RINGRAZIAMENTI**

Ringrazio il mio Tutor. Prof. Paolo Russo, che ha compreso e gestito tutte le difficoltà esterne, tecniche e personali, che ho incontrato nel percorso svolto.

Ringrazio poi l'Arch. Paolo Cocca della Fluke Italia, per il contributo strumentale e tecnico.

Sento di dover ringraziare poi tutta la mia famiglia: mia madre, mio padre, e, in particolare, mio marito e collaboratore Alfredo, che mi ha aiutato in tanti modi, con la sua fiducia in me e nelle mie scelte, il suo tempo nel sostituirmi in famiglia, da architetto sul lavoro, e anche dandomi il suo contributo diretto, quando ne avevo necessità.

Dedico questo lavoro a lui e ai nostri bambini.

## INDICE GENERALE

•	<i>INTRODUZIONE.....</i>	<i>6</i>
•	<i>DESCRIZIONE DEL TEMA SCELTO – OBIETTIVI DELLA TESI.....</i>	<i>12</i>
•	<i>MATERIALI E METODI.....</i>	<i>14</i>
•	<i>LE BASI SCIENTIFICHE DELLA TERMOGRAFIA – LA FISICA TECNICA E LE DEFINIZIONI.....</i>	<i>15</i>
	La teoria di base sulla strumentazione ad acquisizione ottica.....	22
•	<i>STATO DELL'ARTE – FOTOGRAMMETRIA TRADIZIONALE E DIGITALE.....</i>	<i>26</i>
	La fotogrammetria.....	26
	Il raddrizzamento fotografico .....	27
	La geometria della ripresa.....	28
	Raddrizzamento geometrico e analitico.....	29
	La trasformazione proiettiva.....	31
	L'acquisizione dei dati e dell'immagine e la restituzione grafica.....	33
•	<i>TERMOGRAFIA E MACCHINE TERMOGRAFICHE.....</i>	<i>41</i>
•	<i>I SENSORI, I SENSORI TERMICI, L'USO NELLA TERMOGRAFIA E L'ACQUISIZIONE DEL DATO.....</i>	<i>47</i>
•	<i>STATO DELL'ARTE – INDAGINI TERMOGRAFICHE PER I BENI CULTURALI E FOTOGRAMMETRIA.....</i>	<i>51</i>
•	<i>LO STATO DELLA RICERCA SUL TEMA SCELTO.....</i>	<i>53</i>
	SEZIONE DEDICATA ALLA TERMOGRAFIA.....	53
	SEZIONE DEDICATA ALLA FOTOGRAMMETRIA.....	59
	SEZIONE DEDICATA ALL'INTEGRAZIONE DELLE TECNICHE.....	60
•	<i>UTILIZZO DELLE RICERCHE ELENcate AI FINI DEL PRESENTE STUDIO</i>	<i>64</i>
•	<i>LA TERMOCAMERA FLUKE TIR32.....</i>	<i>67</i>
•	<i>LA FOTOCAMERA OLYMPUS SZ20 COMPATTA.....</i>	<i>72</i>
•	<i>IL METODO SCIENTIFICO APPLICATO AL PRESENTE STUDIO.....</i>	<i>74</i>
•	<i>DESCRIZIONE DELLA TECNICA DI RILIEVO .....</i>	<i>77</i>
•	<i>INDIVIDUAZIONE DEI FATTORI CHE INFLUISCONO SUL RILIEVO.....</i>	<i>82</i>
•	<i>ACQUISIZIONE DELL'IMMAGINE DA TERMOCAMERA.....</i>	<i>85</i>
•	<i>ACQUISIZIONE DELL'IMMAGINE DA FOTOCAMERA.....</i>	<i>91</i>
	Pannello di calibrazione fotografico e termico.....	92
•	<i>CALIBRAZIONE DELL'IMMAGINE ACQUISITA DA TERMOCAMERA.....</i>	<i>102</i>

La calibrazione della termocamera integrata.....	102
La calibrazione della termocamera e di una macchina fotografica amatoriale.....	103
I programmi di calibrazione-elaborazione.....	107
• <i>LA TECNOLOGIA “LOW COST” PER EFFETTUARE IL RILIEVO CON STRUMENTAZIONE DI BASE.....</i>	<i>112</i>
• <i>EFFETTUAZIONE DEL RILIEVO SUL TEMA DI STUDIO SCELTO.....</i>	<i>120</i>
• <i>ELABORAZIONE DEL DATUM E RESTITUZIONE GRAFICA .....</i>	<i>125</i>
• <i>DEFINIZIONE DEI PRINCIPALI PROBLEMI RILEVATI E IPOTESI DI LORO RISOLUZIONE.....</i>	<i>132</i>
• <i>ELENCO DEGLI ELEMENTI RILEVABILI, IDENTIFICAZIONE DEI MATERIA- LI CHE COMPONGONO DETTI ELEMENTI .....</i>	<i>135</i>
• <i>CONFRONTO CON L'IMMAGINE RETTIFICATA OTTENUTA DA TERMOCA- MERA DI ALTA GAMMA CON SOVRAPPOSIZIONE AUTOMATICA DELLE IM- MAGINI – VALUTAZIONE DELL'EVENTUALE ERRORE.....</i>	<i>141</i>
• <i>OSSERVAZIONI SULL'ACCETTABILITA' DEL DATO GEOMETRICO (PRE- CISIONE E ACCURATEZZA DEL DATO DA RILIEVO DEGLI ELEMENTI SOT- TO L'INTONACO).....</i>	<i>144</i>
• <i>UN CASO DI STUDIO – SPUNTI PER ULTERIORI APPROFONDIMENTI E UTILIZZI DELLA TECNICA.....</i>	<i>147</i>
Il muro interno di edificio storico.....	147
• <i>CONCLUSIONI.....</i>	<i>152</i>
• <i>BIBLIOGRAFIA.....</i>	<i>154</i>
Libri e testi.....	154
Internet e pubblicazioni.....	154

## INTRODUZIONE

Il rilievo geometrico dei beni culturali viene oggi svolto secondo modalità ampiamente testate e utilizzate. Esistono studi negli ultimi anni che introducono l'uso di tecniche integrate, provenienti da campi apparentemente non collegati, e che cercano di dare struttura e fondamento scientifico a nuove metodologie di rilievo dei beni culturali. L'interesse, come espresso nello studio di G. Bitelli, va dal rilievo a fini di restauro, a quello utile per la diagnostica, a quello impiegato per visualizzazioni e esplorazioni di realtà virtuali, nei campi turistico e ricreativo.

Come però risulta chiaro, ogni caso è un caso specifico e a sé, che alle volte richiede l'individuazione di sistemi e tecniche, o procedure, particolarmente ideate al fine preposto e alla particolarità e allo stato dell'oggetto rilevato, che tenga anche conto di diverse scale di rilievo da integrare tra loro.

Si ritiene di poter definire due grandi gruppi di tipologie di rilievo:

- rilievi di tipo non distruttivo
- rilievi di tipo distruttivo

Le trattazioni sulle prove distruttive e non distruttive da effettuare sui materiali sono innumerevoli. Pertanto in questa tesi provvederò a enunciare le caratteristiche di entrambe, classificandone i principali metodi, al fine di chiarire le modalità attualmente in uso per i rilievi edilizio-architettonici geometrici, anche di tipo storico.

Durante il rilievo, a seconda dell'obiettivo del Committente, è spesso necessario risalire al maggior numero di dati possibili riguardanti l'oggetto indagato. I metodi di indagine devono essere non distruttivi, ciò non ostante la maggior parte di essi è almeno micro-distruttiva.

Le indagini si distinguono in quelle che richiedono il prelievo di una parte dell'opera e quelle che si effettuano sull'opera in situ e in toto. Nel primo caso è

necessario che il campione sia estremamente ridotto e prelevato in luogo meno visibile possibile rispetto all'opera: molto spesso in effetti il campione necessario è piccolo rispetto ai frammenti che si staccano o si sollevano o si perdono in seguito al degrado. Va fatto un bilancio tra il danno dovuto al prelievo a scopi scientifici e il bene ciò che l'indagine successiva al prelievo può determinare.

In ogni caso il prelievo a scopo scientifico deve essere effettuato con modalità controllate e in zone selezionate oculatamente, mentre l'attacco dovuto al degrado è casuale e pertanto può danneggiare l'opera deturpandola. Il prelievo inoltre non deve in alcun modo alterare o danneggiare il contenuto espressivo estetico e materiale dell'opera.

Di seguito si descrivono brevemente le principali caratteristiche dei controlli di struttivi e dei controlli non distruttivi.

In ogni caso, qualsiasi metodo seguito, deve rispettare criteri scientifici, ovvero:

- il numero dei rilievi o dei campionamenti deve essere scelto il minimo possibile, per consentire la non alterazione dell'opera e della sua valenza tecnica-strutturale-artistica;
- i campioni o i rilievi devono essere rappresentativi del problema che si va ad indagare e significativi, oltre che non alterati da fattori esterni e non inquinati;
- lo strumento utilizzato per l'indagine deve essere definito per sensibilità, adeguatezza rispetto all'oggetto da misurare, range di misurazione (portata);
- la misurazione deve essere riproducibile e ripetibile, indipendentemente dall'operatore che la esegue;
- gli errori devono essere identificabili, e vanno distinti tra errori sistematici, non eliminabili, ed errori accidentali, che vanno eliminati o ridotti al minimo.

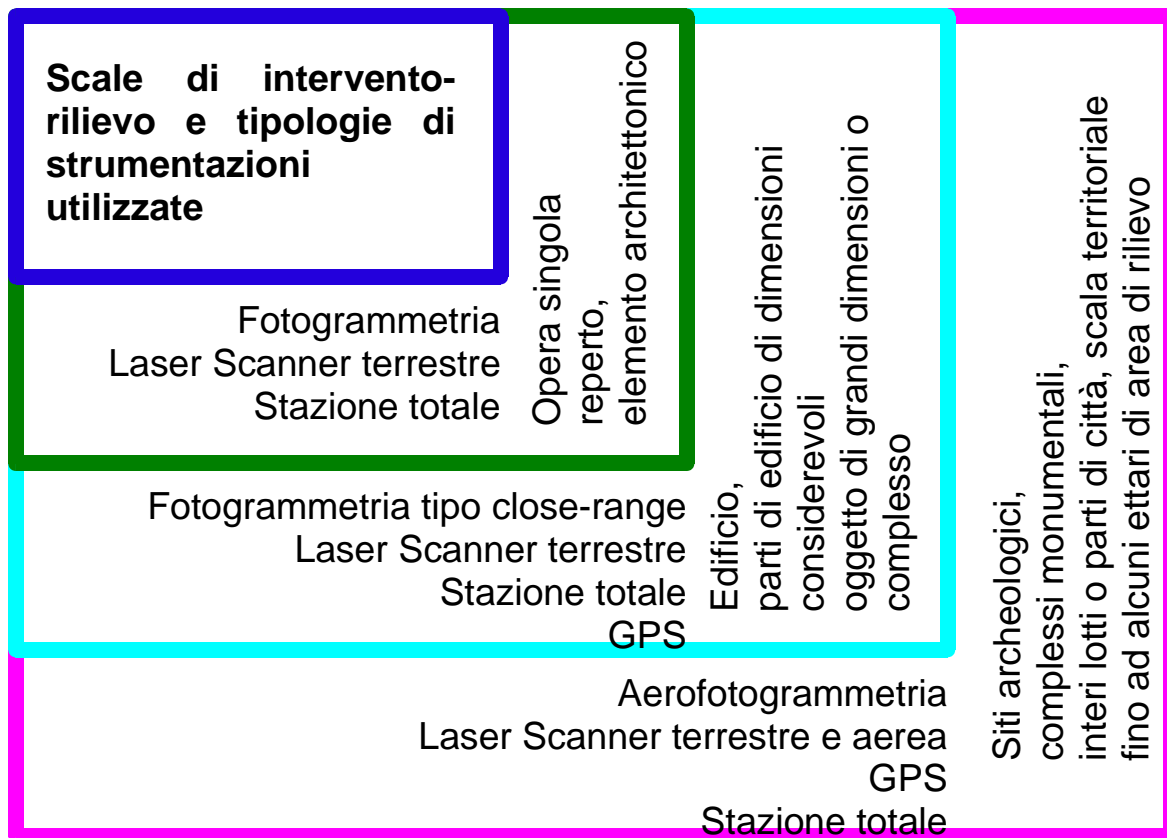
Si elencano i principali tipi di indagini utilizzate nel rilievo dei beni architettonici e culturali, descrivendone le principali caratteristiche.

- Diffrazione a raggi X: indagine distruttiva omicro-distruttiva che risale alla composizione dei materiali del campione, mediante l'angolo di diffrazione con il quale i diversi materiali respingono i raggi, rispetto al raggio incidente. È utilizzata per l'analisi qualitativa e cristallografica di tutti i materiali solidi, cristallini o amorfi.

- Trasmissione e assorbimento di energia: indagine distruttiva su campione prelevato. Le misure dell'assorbimento, prevalentemente di tipo qualitativo, vengono lette nel campo del visibile, dell'infrarosso e dell'ultravioletto. Con campioni solubilizzati si ottengono anche dati quantitativi.
- Fluorescenza a raggi X: analisi non distruttiva, con buona sensibilità, realizzabile in situ, che restituisce la composizione superficiale di un campione rintracciando/analizzando materiali inorganici, come metalli, leghe, materiali ceramici, o lapidei, vetri, prodotti di corrosione, depositi e pigmenti. Questa stessa tecnica inoltre da informazioni di carattere tecnico e stilistico sulle tecniche di esecuzione di un'opera.
- Fluorescenza ultravioletta: tecnica non distruttiva, con tempi di rilevazione relativamente brevi. Restituisce, su lastra fotografica, molti dati sulla conservazione dell'opera e su differenti periodi di restauro che si sono succeduti sulla stessa.
- Microanalisi: prove a campione, effettuate in laboratorio, distruttive. Usate soprattutto per identificare i pigmenti pittorici.
- Analisi metallografiche e spettrometria di massa: tecniche diagnostiche distruttive o micro-distruttive, per l'identificazione dei materiali componenti dei beni culturali.
- Tomografia assiale computerizzata non distruttiva: tecnica non distruttiva che consente l'individuazione di vuoti materici non visibili, fratture, disomogeneità. Si basa sul diverso assorbimento che i vari materiali (ad esclusione di quelli plastici) hanno dei raggi X o  $\gamma$ .
- Tecniche termografiche non distruttive: usata da alcuni anni per individuare umidità, identificazione di strutture, posizione e stato dell'impiantistica, distacchi consistenti.
- Tecniche "olografiche" come il rilievo mediante LASER scanner: metodo di rilievo non distruttivo che restituisce la forma tridimensionale
- Fotogrammetria classica e digitale



Generalmente questo tipo di rilievo ha come obiettivo quello di valutare l'effettivo comportamento e l'integrità di un'opera, oltre che per controllare lo stato di conservazione dei materiali.



Schema 1: scale di rilievo e strumentazioni

I controlli e le prove di tipo distruttivo spaziano dal prelievo di piccolissime quantità di materiali o parti di opere, ovvero dall'asportazione di consistenti quantità e parti e alla loro "distruzione" durante le analisi/prove, che vengono poi analizzate e studiate in laboratorio. Lo studio può riguardare la composizione, macro e micro-molecolare (analisi chimiche e chimico-fisiche) dei materiali che costituiscono il provino. Obiettivo principale è identificare le componenti il materiale stesso, ottenerne una datazione, verificarne lo stato di conservazione, verificare le caratteristiche strutturali.

All'interno del primo gruppo si possono far convergere tecniche e tecnologie che provengono dai più differenti campi di applicazione e che oggi possiamo riassumere nel seguente modo:

- rilievo topografico - geomatica: rilievo con stazioni, laser scanner, fotogrammetria etc
- rilievo fotogrammetrico: rilievo effettuato a partire da immagini fotografiche, opportunamente modificate mediante algoritmi che eliminino le distorsioni delle immagini
- rilievo architettonico-storico: rilievi e analisi del degrado, corredati da analisi chimico-fisiche rientranti nel campo delle tecniche non distruttive, su campioni di ridottissime quantità di materiali e prelievi eseguiti in zone non a vista
- “rilievo termografico”: è un settore in fase di sviluppo, che dipende moltissimo dalla sensibilità termica del sensore. Va valutato attentamente lo stato dell'arte, in quanto l'applicazione di tecniche di diagnostica nel campo del rilievo è del tutto nuovo e in fase di studio e sviluppo

Il rilievo topografico - geomatico viene incluso in diverse classificazioni in base ad alcune sue caratteristiche. Viene definito anche rilievo indiretto in quanto le misure non vengono prese direttamente sull'oggetto. È definito anche rilievo strumentale poiché utilizza differenti tipi di strumenti per ottenere il dato geometrico dall'elemento/oggetto edilizio rilevato. Un altro elemento che differenzia il rilievo diretto dalla topografia (ed anche dalla fotogrammetria) da altri tipi di rilievo, è il fatto che nel primo vengono prelevate principalmente misure lineari, mentre negli altri si sfruttano le proprietà delle intersezioni dei raggi proiettivi e visuali, utilizzando misure derivate da valori angolari.

In particolare fin dal XV secolo le modalità di acquisizione dei dati ruotano sostanzialmente intorno alla possibilità di ricavare informazioni attraverso i principi di proiezione e sezione che, nel tempo, hanno dato origine a due distinte metodologie.

In un metodo le misure sono ricavate soprattutto sezionando con un piano il fascio di raggi proiettanti che, partendo da un punto noto descrivono la forma dell'oggetto (intersecazione della piramide visiva): dalla prospettiva legittima alla fotogrammetria digitale.

Nell'altro metodo i punti singolari dell'oggetto sono definiti come intersezione di due distinte visuali che hanno origine in due punti noti, e quindi attraverso la

risoluzione dei triangoli che si formano. A questa seconda famiglia appartiene appunto la topografia. Il semplice principio della triangolazione, o dell'intersezione in avanti, permette di definire l'oggetto attraverso la misura di angoli, mentre la misura di distanze è ridotta al minimo. Questo è uno dei motivi dello sviluppo continuo della topografia: la misura di angoli è un problema risolvibile, mentre la misura diretta di lunghe distanze, tra punti a volte inaccessibili, ha sempre costituito un problema di difficile risoluzione.

La precisione che la topografia ha raggiunto nel corso dei secoli è connessa agli sviluppi del calcolo e della tecnica.

La trigonometria, il calcolo logaritmico da una parte e l'avanzamento tecnologico della strumentazione dall'altra, hanno continuato ad apportare migliorie nell'intero processo di acquisizione e calcolo. Negli ultimi anni l'introduzione del calcolatore e l'utilizzo dei principi elettromagnetici hanno permesso ulteriori innovazioni.

Tutte queste migliorie hanno contribuito a modificare la topografia degli inizi e la relativa metodologia rendendola anche molto complessa in alcuni aspetti.

Attualmente le tecniche topografiche sono numerose, in continua evoluzione, soprattutto strumentale.

Sono poi numerose le integrazioni e le compenetrazioni dei vari tipi di rilievo in più settori, che verranno descritte nel capitolo relativo all'integrazione delle tecniche di rilievo.

## **DESCRIZIONE DEL TEMA SCELTO – OBIETTIVI DELLA TESI**

Un primo utilizzo di una termocamera su una parete di intonaco (priva quindi di riferimenti ben definiti) ha mostrato la possibilità di avere una “lettura” dell'orditura muraria al di sotto dello stesso.

Dai vari tentativi di sovrapposizione dell'immagine termica con la corrispondente immagine fotografica si è evidenziato un primo problema. Le due immagini, termografica e fotografica, per termocamere semplici che costano meno di 10.000€, ovvero la gamma di prodotti che hanno un costo tra 2500€ e 6000€ (quindi la quasi totalità delle termocamere vendute), sono immagini indipendenti. Derivano dalla presa contemporanea effettuata attraverso due ottiche distinte, con assi ottici indicativamente paralleli, ma non coassiali e non coincidenti. Le immagini inoltre, a seconda delle caratteristiche della camera, hanno anche dimensione (numero di pixel -vedi capitolo ) differente. Dette immagini, elaborate anche con programma specifico fornito dal produttore della termocamera, si riescono a sovrapporre in post-elaborazione con modalità di spostamento relativo manuale, ovvero mediante l'individuazione di almeno quattro punti comuni sulle entrambe le immagini. L'operazione avviene a mezzo dell'operatore, quindi è sicuramente soggetta ad un certo numero di errori, dovuti all'operatore e alla differente definizione delle immagini. Se la sovrapposizione dovesse avvenire tra un'immagine termica da termocamera e un'immagine fotografica da macchina fotografica, anche amatoriale, conterrebbe in più la possibilità che i due assi ottici di presa, appartenenti a due strumenti distinti, non siano nemmeno paralleli tra loro e direzionati allo stesso modo rispetto all'oggetto della ripresa.

In ogni caso, la scelta e l'individuazione dei 4 punti “omologhi” che si devono identificare su entrambe le immagini, quando le pareti o gli elementi sono uniformemente intonacati, ovvero quando le superfici risultano affrescate, è quanto meno difficoltosa e gravata da grande imprecisione, per non dire

praticamente impossibile in assenza di elementi architettonici significativi al contorno, che possano essere chiaramente identificati sia nella immagine fotografica sia nell'immagine termica.

Obiettivo del presente studio è individuare una tecnica per effettuare questa operazione con precisione, e poter rilevare geometricamente e, ove possibile, identificarne le caratteristiche tecniche, strutturali e di composizione materiali, senza effettuare la demolizione dell'intonaco o la rimozione dell'elemento di pregio. È spesso utile poi, per evitare errori in fase di ristrutturazione recupero o risanamento, poter effettuare un rilievo geometrico corretto, referenziato agli elementi architettonici adiacenti, e poterlo riportare su modello virtuale, da elaborare successivamente e arricchire di dati storici, di degrado etc.

E' necessario definire sinteticamente lo stato dell'arte per il rilievo dei beni culturali e architettonici, in particolare per le tecniche topografiche, fotografiche e relativo alla restituzione geometrica degli elementi architettonici. A questo va aggiunto lo stato dell'arte relativo all'uso tecnico-diagnostico-rilievo per le tecniche termografiche, per le quali è utile comprendere l'utilizzo nello specifico contesto che è stato qui individuato come obiettivo dello studio. Va poi rappresentato lo stato dell'arte nell'uso integrato delle varie tecniche descritte.

Posto che la termocamera identifica delle linee di divisione tra elementi a temperature (emissività) differenti, occorre avere dei marcatori (marker) da apporre sulle superfici rilevate, di riferimento, sia per la ripresa fotografica sia per quella termica, definendo modalità e campo di utilizzo di suddetta tecnica in base agli obiettivi fissati.

## MATERIALI E METODI

Per questo studio sono stati utilizzati:

- gli studi pubblicati precedentemente alla stesura del testo (indicativamente fino alla fine del 2012), e relativi ai rilievi da termocamera, da fotocamera, all'integrazione delle varie tecniche di rilievo per i beni culturali e architettonici;
- materiali vari a confronto, in rilievo da termocamera, per le verifiche delle emissività e l'identificazione di quelli maggiormente idonei per la composizione del pannello di calibrazione.

Per l'identificazione di un oggetti tester si è provveduto alla scelta di un edificio costruito con tecniche e tecnologie miste, in modo da poter testare la tecnica individuata su più variabili. L'edificio è stato nella piena disponibilità, anche relativamente allo stato finale che ha richiesto la demolizione di parte degli intonaci per poter verificare l'attendibilità del dato geometrico rilevato con misurazione indiretta.

Per l'applicazione della tecnica "low cost" su un caso di studio reale, si è utilizzato un edificio storico della zona di Vignola (MO), già precedentemente in parte rilevato e indagato con tecniche di rilievo topografiche. I dati qui ottenuti sono stati integrati a quelli esistenti, in post elaborazione, per ottenere un rilievo geometrico della parete intonacata, sul modello tridimensionale esistente.

Relativamente al metodo applicato per le prove, gli esperimenti, la creazione e la verifica del funzionamento dei prototipi, ci si è avvalsi, con gli opportuni adattamenti, dell'applicazione del metodo scientifico classico, come spiegato in seguito nel capitolo specifico.

## **LE BASI SCIENTIFICHE DELLA TERMOGRAFIA – LA FISICA TECNICA E LE DEFINIZIONI**

Esiste una differenza sostanziale tra il concetto di “calore” e quello di “temperatura”.

Per “calore” si intende la forma macroscopica sotto la quale l’energia passa da un sistema fisico ad un altro.

Per “temperatura” invece si intende lo stato termico proprio di un corpo, in un determinato momento: in particolare rappresenta lo stato di agitazione molecolare e degli atomi che costituiscono la materia.

Il rilievo termografico produce un' “immagine termica” di un oggetto, che può essere posizionato a qualunque distanza, non necessita di alcun contatto fisico e non influenza in alcun modo la temperatura di superficie dell’oggetto rilevato.

Verso la metà dell'ottocento, la verifica dell'esistenza dell'infrarosso “vicino” attraverso lo studio del campo di radiazioni denominato “infrarosso termico”, ha portato allo studio e all'impiego scientifico e fisico di detti studi nella fotografia.

L'irraggiamento termico è il principio fisico su cui si basa la tecnica di rilievo termografico all'infrarosso. Ogni volta che due o più corpi, con temperature diverse, si trovano in presenza l'uno dell'altro, si genera trasmissione di calore per irraggiamento, anche se separati da un mezzo che sia sufficientemente trasparente alle radiazioni. Ognuno dei corpi emette energia radiante e nello stesso tempo può riceverne dagli altri, assorbendo almeno in parte l'energia ricevuta. Anche il mezzo prende parte attiva allo scambio per radiazione, in quanto può emettere e assorbire l'energia radiante. Per effetto della sua temperatura ogni corpo emette una radiazione elettromagnetica che si definisce “irraggiamento termico”.

L' emissione superficiale caratterizza il comportamento della maggior parte dei solidi e dei liquidi. In questi ultimi, infatti, la radiazione emessa dalle molecole

interne è fortemente assorbita da quelle adiacenti, per cui la radiazione che proviene da un corpo solido o liquido è solo quella emessa dalle molecole che si trovano entro la distanza di 1[ $\mu\text{m}$ ] dalla superficie esposta.

Tutti i corpi a temperature maggiori dello “zero assoluto” (-273°C) irradiano energia sotto forma di onde elettromagnetiche.

Lo spettro delle onde elettromagnetiche si può convenzionalmente dividere in bande di lunghezze d'onda a seconda delle proprietà che si vogliono considerare, che sono tutte governate dalle stesse leggi. Il campo di lunghezze d'onda corrispondente alla radiazione termica è quello compreso tra 0.1 [ $\mu\text{m}$ ] e 100 [ $\mu\text{m}$ ]. Questo campo comprende, a sua volta, parte dell'ultravioletto, la banda del visibile (da 0,38  $\mu\text{m}$  a 0,76  $\mu\text{m}$ ) e parte dell'infrarosso.

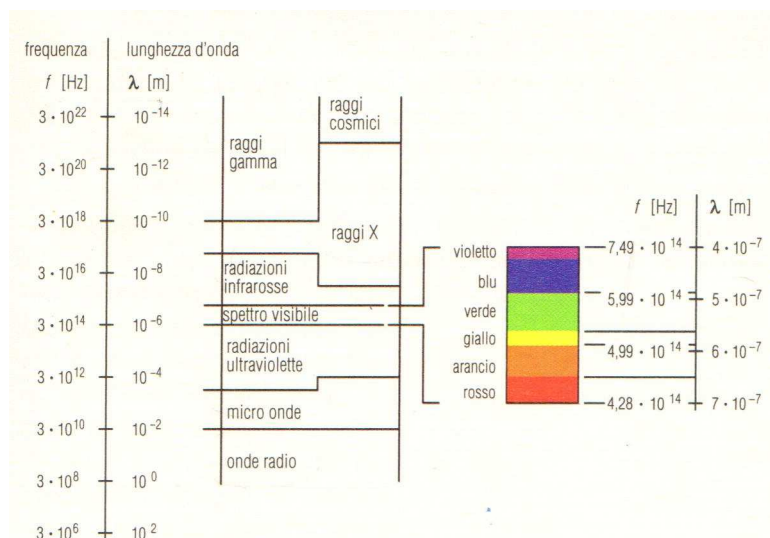


Immagine 1: spettro delle onde elettromagnetiche

L'infrarosso è caratterizzato da radiazioni di lunghezza d'onda comprese tra 0.75 [ $\mu\text{m}$ ] e 1000 [ $\mu\text{m}$ ] e confina, dal lato delle piccole lunghezze d'onda, con la regione del visibile e, dal lato delle grandi lunghezze d'onda, con le microonde. Le frequenze emesse dalle particelle dei corpi, che sono sempre in movimento, coprono tutto lo spettro infrarosso e in particolare:

- particelle subatomiche che forniscono la maggior parte delle radiazioni nella banda dell'infrarosso vicino (IR);
- particelle atomiche i cui movimenti producono radiazioni nella banda del



medio IR;

- molecole le cui vibrazioni e rotazioni generano radiazioni nel lontano IR.

La correlazione tra la temperatura del corpo e la radiazioni infrarossa fa sì che il calore, che è energia cinetica si trasferisca alle particelle descritte precedentemente. La temperatura è il livello di agitazione di queste particelle: più alto è il loro contenuto energetico, maggiore sarà l'agitazione e più alto sarà il livello di temperatura, a cui il corpo si trova. Questo significa che più alta è la temperatura, più elevata sarà l'intensità della radiazione infrarossa emessa.

Il rilievo termografico fornisce di un corpo esclusivamente la mappa termica *superficiale*. L'emissività è una caratteristica fisica propria del materiale di cui è costituito l'oggetto studiato e, in particolare, della sua superficie visibile.

Il valore di emissività, da definizione matematica, può essere compreso tra 0 (corpo completamente riflettente) e 1 (corpo completamente opaco, il cosiddetto "corpo nero", come definito in fisica). Non è possibile misurare in modo attendibile la temperatura di corpi trasparenti alla radiazione termica o che la riflettono in modo sensibile (che hanno quindi, in quest'ultimo caso, un basso valore di emissività, prossimo allo zero). E' possibile valutare termicamente in modo attendibile solo corpi opachi, caratterizzati quindi da un alto valore di emissività, il più prossimo possibile al valore 1.

La temperatura del corpo emettitore è proporzionale alla radiazione emessa, in base alla Legge di Planck, di seguito riportata, che consente di determinare la distribuzione spettrale della radiazione emessa dal corpo:

$$(f.1) \mathbf{E = h \times v}$$

dove **h** è la costante di Planck, misurata nel SI in joule secondi e vale  $6,625 \times 10^{-34} \text{ J} \times \text{s}$

e **v** è la frequenza della radiazione, misurata in hertz.

La correlazione tra irraggiamento e temperatura è fornita dalla legge di Stefan-Boltzmann, che consente di determinare la potenza termica radiante globalmente emessa, definita come  $E_n$  :

$$(f.2) \mathbf{E_n = \sigma \times T^4}$$

ove  $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzmann e vale  $5,6703 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ ,  $\epsilon$  è l'emissività della superficie emittente (variabile tra i limiti teorici 0 e 1) e  $T$  è la sua temperatura assoluta. Graficamente per ogni temperatura  $E_n$  è rappresentato dall'area sottesa dalla rispettiva curva tracciata nel grafico.

L'emissività è data dal rapporto tra l'emissione globale del corpo analizzato, e l'emissione del corpo nero alla medesima temperatura.

$$(f.3) \epsilon = E/E_n$$

dove  $E$  è l'energia del corpo indagato e  $E_n$  quella del corpo nero a pari temperatura.

Inoltre, la legge di Wien stabilisce come la temperatura degli oggetti determini in modo univoco la regione dello spettro elettromagnetico dove si ha la massima emissione di radiazione

$$(f.4) \lambda_{max} \times T = \text{costante}$$

L'emissività può essere considerata il parametro di riferimento per poter effettuare un'indagine termografica del materiale indagato. La pratica dimostra che, all'interno del singolo fotogramma termografico (termogramma), si individuano punti di interesse diversi che corrispondono a materiali diversi o all'interazione di tra gli stessi.

Le emissività dei materiali in genere sono fortemente dipendenti dalla direzione dei raggi, la cui distribuzione, dal corpo emettente, varia e si modifica a seconda del materiale, della forma del materiale, e del mezzo. Essa inoltre varia con il grado di finitura superficiale, e con la temperatura. Valori indicativi sono i seguenti:

*Materiali non metallici  $e > 0,8$*

*Cemento  $e = 0,8, 0,9$*

*Superfici metalliche lucidate  $0,03 < e < 0,04$*

*Superfici metalliche ossidate  $0,6 < e < 0,9$*

*Pelle ( $q = 90^\circ$ )  $e \gg 0,9$*

*Vetro  $e = 0,9, 0,95$*

Acqua  $e = 0,96$

E' possibile definire anche l'emissività monocromatica direzionale, che identifica le caratteristiche dei singoli materiali. L'elaborazione analitica del passaggio dall'emissività globale a quella mono-direzionale è complessa e non avrebbe senso riportarne i singoli passaggi. In ogni caso è fondamentale chiarire che le termocamere rilevano il dato mono-direzionale, dato che il sensore recepisce l'onda termica, acquisendo prevalentemente quella che collega il corpo con il sensore stesso. La tabella che ragionevolmente viene utilizzata per identificare i materiali con termocamera è la seguente.

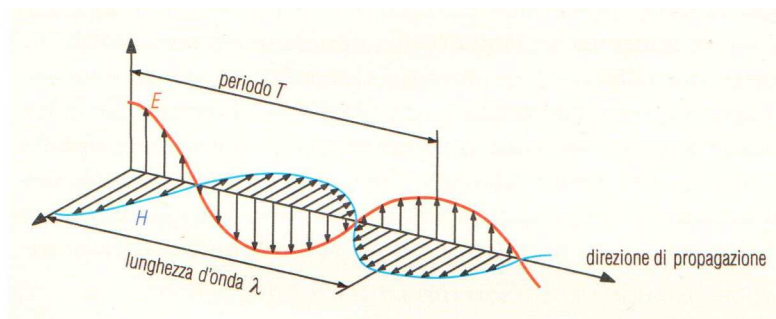
Materiale	Emissività totale
Alluminio lucidato	0.05
Alluminio, in fogli	0.04
Mattone, comune	0.85
Mattone, smaltato, grezzo	0.85
Mattone, refrattario, grezzo	0.94
Bronzo, poroso, grezzo	0.55
Calcestruzzo	0.54
Rame, lucidato,	0.01
Nastro elettrico, plastica nera	0.95
Vetro	0.92
Ferro, laminato a caldo	0.77
Ferro, lucido, satinato	0.16
Carta, bianca	0.90
Acciaio, laminato	0.24
Formica	0,93
Legno quercia piallata	0,9
Intonaco	0,86-0,90

Schema 2: spettro delle onde elettromagnetiche

Resta inteso che, nel caso non ci siano materiali noti, ovvero non si conosca il materiale inquadrato nella termocamera, si può sempre usare un "trucco" pratico, per identificarne la composizione-natura. Si appone un pezzo di nastro nero tipo isolante, al cui emissività è considerata vicina a quella del corpo nero, ovvero pari a 1 (per impostazione di dati si potrà selezionare solamente il valore 0,99), e si ricaveranno, direttamente o anche in post-elaborazione, e rispetto al dato impostato manualmente su quel materiale assimilabile al corpo nero, le emissività "relative" di tutti gli altri materiali inquadrati.

La misura della temperatura superficiale di una superficie è un dato indiretto che si ricava attraverso la "lettura" della radiazione elettromagnetica emessa

(raggi IR infrarosso). Come già specificato, e sottolineando alcune eccezioni ( i materiali metallici hanno emissività molto bassa e che non dipende dalla temperatura), ogni corpo, se a temperatura superiore allo zero assoluto (  $-273^{\circ}\text{C}$ ), emette onde nel campo dell'infrarosso.



*Immagine 2: caratteristiche di propagazione dell'onda*

La radiazione registrata infatti è composta da tre contributi: radiazione emessa, radiazione trasmessa e radiazione riflessa.

Pertanto risulta necessario definire anche la riflessività.

La riflessività è definita come la capacità di un oggetto di riflettere le radiazioni IR. Dipende perciò dalla temperatura, dalle proprietà superficiali e dal materiale che compone l'oggetto.

A parità di materiale, una superficie lucida e liscia riflette maggiormente rispetto ad una superficie opaca e ruvida. Per le superfici lisce si ritiene corretto considerare l'angolo di incidenza identico all'angolo di riflessione, definendosi così la riflessione come "speculare".

La trasmissione è invece la capacità propria di un materiale di trasmettere delle radiazioni (sempre IR) e dipende sia dal tipo di materiale sia dalla temperatura dello stesso. La maggior parte dei materiali comunque non è trasmissiva e può essere considerata per la maggior parte dei materiali pari a zero.

Quindi, come precedentemente descritto, ogni oggetto è dotato di una propria emissività (epsilon) caratteristica, di una trasmissività e di una riflessività. In base ad esse e tenendo conto della compensazione della temperatura riflessa (RTC), calcola/ricava la temperatura superficiale dell'oggetto.

La legge di Kirckhhoff per il singolo materiale è questa:

$$(f.5) \ \boldsymbol{\varepsilon + \rho + \tau = 1}$$

che si trasforma in

$$(f.6) \ \boldsymbol{\varepsilon + \rho = 1}$$

per quanto espresso sopra.

Per i materiali con emissività alta (>0,80) o media (tra 0,60 e 0,80) la riflessione è rispettivamente bassa e media e la temperatura dell'oggetto può essere misurata direttamente dalla termocamera senza particolari accorgimenti.

Per materiali con emissività bassa (<0,60) la riflessione è elevata e la temperatura può essere correttamente misurata solo se si imposta la temperatura RTC, temperatura riflessa.

Per quasi tutte le termocamere in commercio, l'impostazione dell'emissività del materiale rilevato è fondamentale per rilevare correttamente la temperatura dell'oggetto, quando essa è molto differente da quella ambientale.

## La teoria di base sulla strumentazione ad acquisizione ottica

Per effettuare un corretto rilievo da termocamera, di tipo classico, occorre tenere presenti le variabili descritte di seguito.

Il campo visivo (FOV) rappresenta, analogamente con quello dell'occhio umano, la porzione di spazio percepito/rilevato dall'ottica della camera o termocamera. Esso si indica con due ampiezze rappresentate in  $^{\circ}$ , che definiscono l'angolo di apertura dell'immagine che viene acquisita misurato rispetto all'asse frontale, che è anche l'asse ottico della termocamera.

Maggiore è il FOV maggiore è l'ampiezza dell'immagine che viene acquisita.

Semplificando lo schema ottico di una fotocamera (per la termocamera il concetto non cambia), posizioniamo il piano della pellicola (nel nostro caso il sensore digitale) ad una distanza  $f$  (la lunghezza focale, appunto) dalla lente (obiettivo). Riducendo l'esempio al solo piano verticale, la variazione di "f" rispetto alla posizione della lente (o sensore digitale) comporta una variazione dell'ampiezza dell'immagine rilevata.

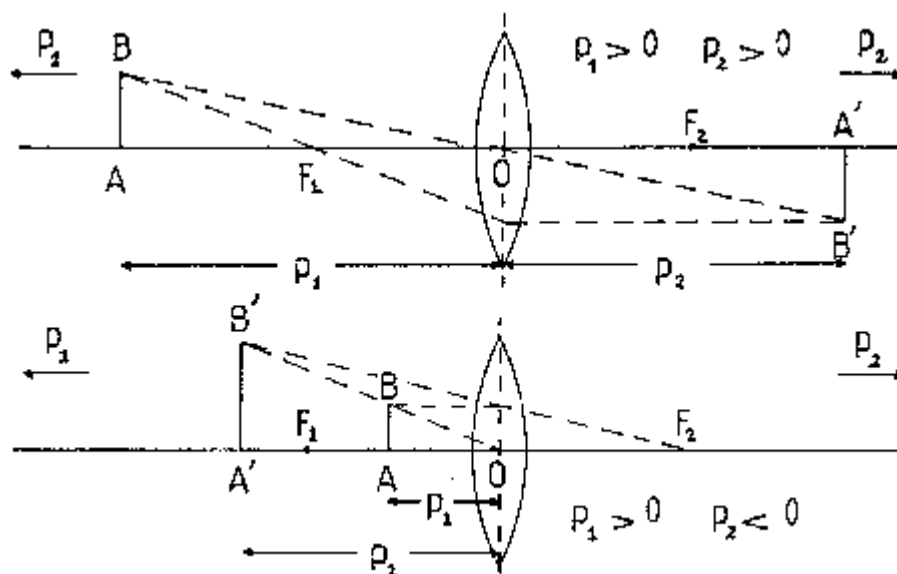


Immagine 3: lenti, focali e immagine visiva da <http://www.br3nn0s.org/scienza/esp2/2/ESP02.htm>

Le altre due variabili da considerare sono il più piccolo oggetto identificabile

(definito  $IFOV_{geo}$ ) e il più grande oggetto o area rilevabile (definito  $IFOV_{mis}$ ). La dimensione del pixel e la distanza dall'oggetto condizionano la grandezza del più piccolo oggetto rilevabile e misurabile. Il numero dei pixel costituisce anche la definizione del "dettaglio" dell'immagine, mentre il pixel è l'unità minima gestibile dal computer sul monitor, o in fase di stampa.

A seconda del numero di pixel che il monitor o il sensore CCD della fotocamera digitale possono gestire, la qualità dell'immagine risultante varia in modo proporzionale: questo vuole dire che, se nello stesso spazio (il monitor o il CCD) trovano posto più pixel, la loro dimensione sarà minore, rendendoli quindi meno visibili ad occhio nudo., ma generando in questo caso un'immagine con maggiore definizione e quantità di informazioni e particolari rilevati. Il termine "risoluzione" indica il numero di punti che il nostro monitor e la nostra fotocamera, riescono a gestire. La **risoluzione geometrica di una immagine digitale** è legata alle dimensioni del pixel ed è collegata alla densità di campionamento D (risoluzione di acquisizione). La risoluzione geometrica indica il numero di pixel contenuti in una opportuna unità di lunghezza; viene solitamente espressa in dot per inch (dpi) o punti per pollice (numero di pixel contenuti un pollice = 25.4 mm). Stabilita la risoluzione di acquisizione di un fotogramma è possibile calcolare la dimensione corrispondente del pixel secondo la relazione:

$$(f.7) \text{ d}_{\text{pixel}}[\mu\text{m}] = 25400/D(\text{dpi})$$

Dalla risoluzione dell'immagine dipende la corretta visualizzazione dei particolari più piccoli e la precisione geometrica conseguibile durante le operazioni di orientamento. La **risoluzione radiometrica di un immagine digitale** è legata al numero di bit utilizzati per rappresentare il suo valore radiometrico e generalmente varia da 1 a 8 bit. Il numero di livelli rappresentabili è pari a  $2^{(\text{numero di bit per pixel})}$ .

- un'immagine con una risoluzione radiometrica di un 1 bit determina una rappresentazione binaria in cui i pixel possono assumere soltanto valori uguali a 0 (corrispondente al bianco) e 1 (corrispondente al nero);

- un'immagine con una risoluzione radiometrica di 8 bit (1 byte) determina una rappresentazione con 256 livelli cromatici. Comunemente viene posto 0=nero e 255=bianco ottenendo valori intermedi che rappresentano le varie gradazioni di grigio (immagini a livello di grigio);

- un'immagine con una risoluzione radiometrica di 24 bit (3 byte) determina una rappresentazione con 16.7 milioni di colori (immagini RGB o true color). Ogni colore viene scomposto nelle tre componenti fondamentali (rosso, blu e verde) e a sua volta ciascun componente è suddiviso in 256 valori che variano da 0 (assenza di colore) a 255 (saturazione del colore). *(Tratto da Università Studi Trieste – Fac. Architettura – Fotogrammetria.ppt)*

Per un rilievo generico fotografico, avendo la possibilità di scegliere la risoluzione con cui fotografare o acquisire le immagini, è meglio optare per quella più elevata, onde evitare di dover inserire punti non reali con il metodo dell'interpolazione al fine di incrementare le dimensioni dell'immagine acquisita troppo piccola. Il processo di interpolazione per aumentare la dimensione dell'immagine, eseguibile solo tramite software dedicati, non fa altro che copiare i pixel adiacenti ed adattarli alla risoluzione finale richiesta. Pertanto, non è in grado di aggiungere più dettaglio rispetto a quello presente in origine sull'immagine. Al contrario, un ridimensionamento dell'immagine non diminuisce la qualità dei pixel, ma determina solo delle dimensioni più piccole della stessa.

Risoluzioni differenti per ogni dispositivo di visualizzazione, che a loro volta determinano la qualità finale percepita in funzione anche della nostra vista. Da qui si comprende come non si possano avvertire differenze qualitative sulle immagini a bassa risoluzione (ad esempio quelle pubblicate sul WEB), indipendentemente dal dispositivo di acquisizione utilizzato, sia esso professionale quanto amatoriale. Esiste quindi un vincolo reale tra dimensione (risoluzione) dell'immagine e dpi effettivi (unità che definisce la risoluzione della stampa) che vanno a finire sulla stampa. Risoluzione e qualità dell'immagine sono proporzionali. In pratica la nostra vista non è in grado di distinguere (alle brevi distanze) oltre 240 dpi, prendendo in considerazione una vista perfetta senza diminuzione di diottrie.

Facendo riferimento alle risoluzioni delle immagini di cui tratteremo, si sottolinea



che l'immagine termica ha comunque una risoluzione non elevata.

La difficoltà maggiore sarà di riuscire ad effettuare correttamente, ove necessario, la calibrazione della stessa per correggere gli errori distorsivi dovuti alla camera utilizzata.

# STATO DELL'ARTE – FOTOGRAMMETRIA TRADIZIONALE E DIGITALE

## La fotogrammetria

La **fotogrammetria** è la scienza che permette di individuare le coordinate di punti tridimensionali partendo da immagini fotografiche.

I risultati delle misure fotografiche possono essere:

- numeri, cioè coordinate di punti oggetto in un sistema di coordinate tridimensionali;
- disegni, cioè carte topografiche rappresentanti particolari planimetrici;
- immagini, di solito fotografie rettificate (ortofotopiani) e mappe da esse derivate (ortofotocarte), ma anche immagini digitali.

Il principio fondamentale su cui si basa la fotogrammetria è la stereoscopia, ovvero la capacità di percepire un oggetto nelle sue tre dimensioni grazie alla visione dello stesso da due punti di vista differenti. Nel caso della visione binoculare umana i due punti di vista sono forniti dai nostri due occhi.

La fotogrammetria terrestre o dei vicini è impiegata nei seguenti casi:

- rilievo di facciate;
- rilievo di beni artistici e particolari architettonici;
- rilievo di siti archeologici e catalogazione reperti;
- rilievo di scene di crimini o incidenti;
- rilievo di piccoli oggetti.

Nella fase di presa la fotogrammetria utilizza delle camere particolari, che a seconda della precisione e delle caratteristiche, si suddividono in:

- camere metriche: dotate di dispositivi di tesatura della pellicola e formati della stessa di 6x6 cm, che permettono di raggiungere una precisione di

$1-2 \cdot (10^4) \cdot D$ , dove  $D$  è la distanza dell'oggetto dal centro di presa. Queste camere sono sempre dotate di un certificato di calibrazione.

- camere semi-metriche: sono camere non nate esclusivamente per la fotogrammetria a cui fra obiettivo e pellicola è stato aggiunto un reticolo di croci (reseau). La precisione raggiungibile con queste macchine è di  $1-2 \cdot (10^3) \cdot D$ .

- camere non metriche: sono camere di tipo amatoriale, non dotate di reticolo né di alcuna informazione sui parametri di orientamento interno. Hanno una precisione di  $1 \cdot (10^2) \cdot D$ .

## Il raddrizzamento fotografico

La *fotografia* è una **prospettiva centrale**, nella quale gli oggetti cambiano forma e dimensione in funzione della loro distanza dal centro di presa. Per questo deve essere trasformata in foto-piano prima di poter essere usata per il rilievo dei punti.

Un *foto-piano* è un'immagine composta da fotografie che hanno subito un trattamento dal punto di vista geometrico per poter diventare delle **proiezioni ortogonali** ad una determinata scala ed essere perciò misurabili. Questo trattamento è il raddrizzamento.

Il *raddrizzamento* delle immagini fotografiche trova il suo campo d'impiego preferenziale nel rilievo di oggetti che siano riconducibili ad una superficie piana, quali facciate o strutture che si sviluppino su di un piano. Gli elementi dell'oggetto che si trovano sul piano scelto verranno individuati e restituiti con la massima precisione raggiungibile, mentre quelli che non si trovano sul piano saranno tanto meno precisi quanto più si discosteranno dal piano stesso: saranno affetti da un errore somma di due termini, uno dimensionale ed uno di posizione (errore di parallasse). La precisione raggiungibile nelle misure eseguite sul piano che viene scelto per il raddrizzamento può variare entro limiti assai ampi, in funzione di diversi parametri:

- geometria della ripresa (distanza della fotocamera dall'oggetto, angolazione della ripresa)
- qualità dell'immagine acquisita (se si tratta di una fotocamera digitale: qualità dell'obiettivo, e del sensore; se si tratta di una fotocamera a pellicola, qualità dell'obiettivo, della pellicola, della stampa fotografica e dello scanner), impiego o meno del treppiede per la ripresa
- misure d'appoggio (numero, disposizione e precisione)

## **La geometria della ripresa**

La linea di mira della fotocamera deve essere il più possibile perpendicolare al piano da elaborare.

Per ottenere buoni risultati indicativamente è bene non scostarsi dalla perpendicolare più di 20°-25°, ed altrettanto vale per quanto riguarda l'inclinazione verso l'alto (o il basso) della fotocamera. I risultati sono tanto migliori quanto meno ci si discosta dalla perpendicolare.

## **La qualità dell'immagine**

Per una fotocamera a pellicola:

- utilizzo di un obiettivo non troppo spinto (lunghezza focale non inferiore a 28-35mm)
- pellicola di bassa sensibilità (ISO/ASA 100)
- ripresa su treppiede
- stampa su carta lucida (massima nitidezza)
- scansione alla massima risoluzione possibile tale da non eccedere le dimensioni massime di 8192x8192pixel

Per una fotocamera digitale valgono esattamente gli stessi criteri delineati per la fotocamera a pellicola, con qualche variante:

- obiettivo non troppo spinto (equivalente ad un 28-35mm)
- ripresa su treppiede
- dimensione dell'immagine non superiore a 8192x8192 pixel

- possibilità di impostare la sensibilità. In questo caso la sensibilità impostata conta meno, in quanto influisce sul “rumore di fondo” dell’immagine e, quindi, sulla resa del colore piuttosto che sulla nitidezza.

## Raddrizzamento geometrico e analitico

Il raddrizzamento viene realizzato da appositi software e può essere di due tipi: geometrico e analitico.

Nel **raddrizzamento geometrico** vanno indicate nella fotografia alcune direzioni che nella realtà sono orizzontali e verticali e vanno fornite alcune lunghezze e altezze reali. L’indicazione delle linee orizzontali e verticali consente di individuare la posizione dei punti di fuga dell’immagine per poi ripristinare orizzontalità e verticalità di tali linee. Le distanze fornite devono essere possibilmente situate sui bordi della fotografia. Questo tipo di procedimento è più corto e richiede un minor numero di misure sul posto.

Il **raddrizzamento analitico** si basa sulle relazioni tra fotogramma e oggetto. Queste relazioni dipendono da 9 parametri che descrivono la posizione della lastra nello spazio (orientamento esterno) e le caratteristiche geometriche della camera (orientamento interno).

Esse sono (**f.8**):

- $X = a_1x + a_2y + a_3/c_1 + c_2y + 1$

- $Y = b_1x + b_2y + b_3/c_1 + c_2y + 1.$

La prima operazione da fare per poter procedere con questo tipo di raddrizzamento è il rilievo di almeno 4 punti di appoggio appartenenti all’oggetto da raddrizzare e il calcolo delle relative coordinate plano-altimetriche. Indipendentemente dal tipo di software, le operazioni da eseguire nel raddrizzamento sono le seguenti:

- Apertura dell’immagine da raddrizzare;

- Apertura della tabella per l'inserimento delle coordinate oggetto ricavate dal rilievo (dei 4 punti di appoggio);
- Stesura della tabella con le relative coordinate immagine, misurate direttamente selezionando i punti sull'immagine digitale;
- Creazione della tabella di unione delle coordinate oggetto e delle coordinate immagine;
- Selezione dell'area da raddrizzare;
- Definizione della risoluzione dell'immagine;
- Raddrizzamento dell'immagine.

Quando si raddrizza una fotografia è necessario valutare gli errori causati dallo scostamento dal piano di riferimento sul quale giacciono i punti o le linee di appoggio. Il raddrizzamento viene considerato corretto se lo spostamento di ogni punto dell'immagine è contenuto entro l'errore di graficismo. Nei foto-piani si considera come piano di riferimento il piano di campagna; la verifica va dunque fatta non alla quota di gronda ma al piede degli edifici. Una volta ottenuti, i fotogrammi raddrizzati si possono unire in modo da ottenere un mosaico che costituisce la carta fotografica.

L'obiettivo della mosaicatura digitale è di mantenere la precisione geometrica delle singole immagini generando un'unica immagine somma delle altre ed eliminando le differenze radiometriche esistenti tra le immagini di partenza, dovute alla differente illuminazione in fase di presa o errori dovuti all'eventuale scansione.

Dal punto di vista geometrico, generalmente si richiede che le due immagini di partenza abbiano lo stesso sistema di riferimento assoluto mentre, per l'aspetto radiometrico, più le immagini sono simili come tonalità migliore sarà il risultato del procedimento. L'acquisizione del dato metrico, per quanto concerne la questione della rappresentazione per oggetti di interesse archeologico, artistico, architettonico, è una fase fondamentale che va progettata, programmata e adattata all'oggetto da rilevare e all'obiettivo ultimo del rilievo.

Le fasi classiche del processo di acquisizione del dato da fotogrammetria, che, a partire dal rilievo, porta alla generazione dei prodotti di rappresentazione, segue sinteticamente le seguenti fasi:

- acquisizione del dato metrico: le caratteristiche delle immagini e dei sensori digitali sono seguite dalla descrizione delle caratteristiche di metodo e di tecnica operativa con corredo di relative problematiche
- calibrazione delle camere digitali, anche non professionali, e elaborazione del dato con software in dotazione e programmi in installazione temporanea o open source
- rappresentazione del dato, mediante raddrizzamenti, ortofoto, etc. e creazione di modelli tridimensionali foto – realistici, generati in base ai dati fotogrammetrici

## **La trasformazione proiettiva**

Dato un sistema di riferimento ortogonale a tre assi principali orientati, un punto nello spazio viene definito nel sistema di riferimento considerato assoluto. Ogni punto nello spazio viene identificato definendo geometricamente le linee rette che passano per tre punti: il punto-oggetto, la sua immagine, il centro della prospettiva fotografica. Queste rette sono definite dalle equazioni di collinearità.

I parametri dai quali dipendono la proiezione di un punto sono 9:

- tre rotazioni  $\varphi, \omega, \kappa$ , contenuti nella matrice di rotazione
- le coordinate  $X_0, Y_0, Z_0$  del centro di proiezione
- la costante  $C$  della camera e le coordinate degli assi di lastra cui sono riferite le coordinate dei punti generici  $P$  rilevati.

I primi sei parametri riguardano l'orientamento esterno della prospettiva, gli altri tre l'orientamento interno. La costante  $C$  della camera metrica viene in genere definita dal costruttore e indicata nel certificato di taratura. Le coordinate dell'origine degli assi possono essere o fornite dal costruttore oppure si possono assumere di valore pari a zero. I parametri di orientamento esterno possono: essere misurati con strumenti tipografici nel caso di prese terrestri da

stazione fissa con treppiede; misurate invece da punti di appoggio, in caso di prese aeree.

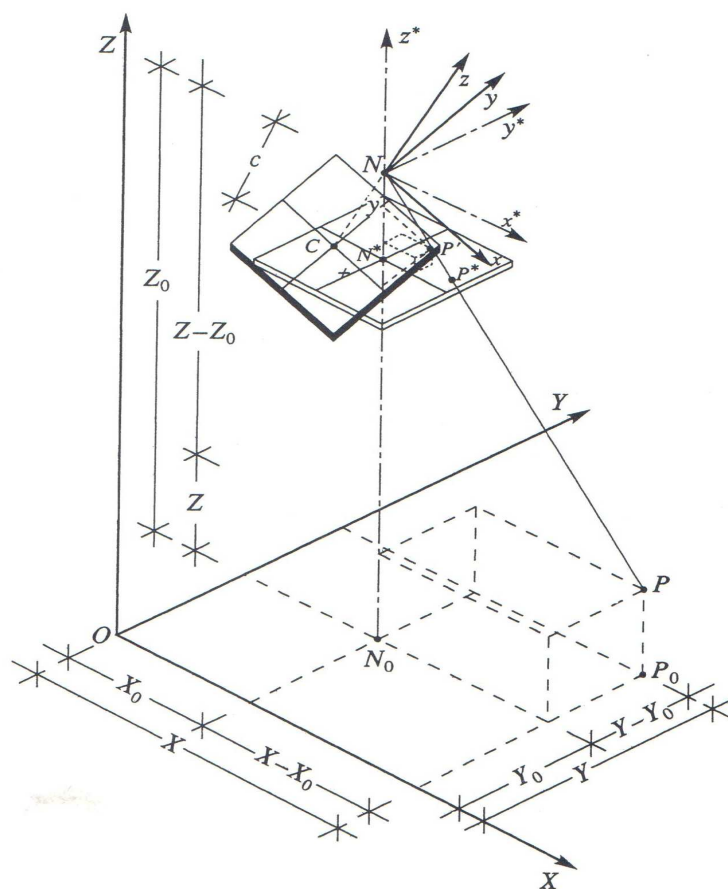


Immagine 4: punto di presa e identificazione dei parametri del punto oggetto nel sistema di riferimento

Per ricostruire la geometria spaziale di un oggetto, cioè al fine di ottenere le coordinate oggetto (terreno) a partire dalle coordinate fotogramma, in generale non è sufficiente un solo fotogramma ma una coppia (restituzione stereoscopica), ad esclusione del caso in cui tutti i punti oggetto giacciono su un piano di quota nota (raddrizzamento o fotopiano) o si abbiano informazioni aggiuntive sulle quote, ad esempio da un DEM (ortofoto o raddrizzamento differenziale).



Nel caso in cui l'oggetto ripreso è bidimensionale, la definizione delle variabili da individuare è più semplice e si può utilizzare, per la restituzione grafica, l'omografia di cui alle formule indicate di seguito (f.9-f10).

$$X = X_0 - Z_0 \frac{r_{11}x + r_{12}y - r_{13}c}{r_{31}x + r_{32}y - r_{33}c}$$

$$Y = Y_0 - Z_0 \frac{r_{21}x + r_{22}y - r_{23}c}{r_{31}x + r_{32}y - r_{33}c}$$

$$X = \frac{a_1x + b_1y + c_1}{ux + vy + 1}$$

$$Y = \frac{a_2x + b_2y + c_2}{ux + vy + 1}$$

## L'acquisizione dei dati e dell'immagine e la restituzione grafica

La fotogrammetria consiste nella misurazione indiretta degli oggetti su immagini fotografiche, al fine di ricostruire le rappresentazioni necessarie, così come si potrebbe fare misurando direttamente sull'oggetto. Perciò l'immagine che viene acquisita deve avere la qualità e la definizione migliori possibili, ovviamente finalizzate allo scopo del rilievo.

La prospettiva è un metodo geometrico per rappresentare oggetti tridimensionali. La fotografia si ottiene mediante l'annerimento di granuli di alogenuro sui argento mediante vari processi chimici e mediante il passaggio di radiazioni luminose di andamento ragionevolmente rettilineo attraverso un sistema di lenti. Nelle camere digitali l'immagine è costituita da pixel (**picture elements**) di varie dimensioni, registrati su "chip" di silicio, con colori in scala di grigio o nei tre colori fondamentali. Nei sistemi di visualizzazione è definito come la più piccola parte visibile dell'immagine. In pratica è l'unità più piccola che la compone, che può essere di pochi micron di lato.

Il funzionamento della fotocamera è assimilabile a quello di un teodolite: dal punto da rilevare il raggio visivo passa attraverso lo spessore della lente e restituisce sul piano dell'immagine il punto immagine. Nella realtà fisica occorre tenere conto della distorsione dell'obiettivo, che viene identificato con la costante  $c$  della camera.

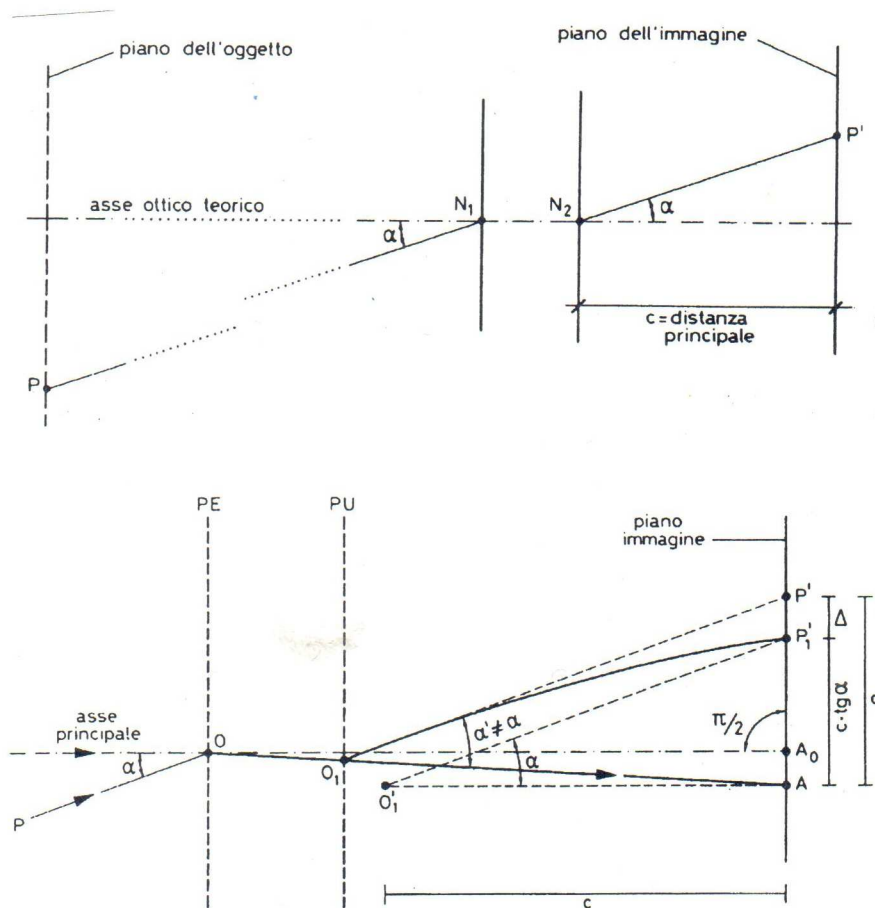


Immagine 5: schema piano, teorico e fisico-reale (con distorsione) del funzionamento della fotocamera

Nel rilievo, vengono ripresi e proiettati numerosi punti, tutti identificabili univocamente sul piano dell'immagine. Quando l'oggetto rilevato non è bidimensionale ma tridimensionale, occorre ricostruire la visione stereoscopica tipica dell'occhio umano, mediante la comprensione del concetto di visione di marca mobile (introdotta a fine ottocento da Friedrich Stolze). Il concetto di visione stereoscopica era infatti già noto da tempo.

La restituzione fotogrammetrica è l'operazione di trascrizione grafica dei dati derivanti da immagini stereoscopiche. Essa avviene a mezzo di uno strumento

detto nel quale si inseriscono due fotografie aventi una parte dell'immagine sovrapponibile (ricoprimento del 60% circa); nel caso di immagini da foto aerea, un particolare dispositivo consente la visione stereoscopica, cioè tridimensionale, della superficie del terreno comune alle due fotografie. Orientando in un sistema comune le immagini, spostandole e disponendole nella posizione di presa si forma il cosiddetto modello stereoscopico, che è una entità visiva, non materializzata, formata dal punto di intersezione ideale dei raggi omologhi (cioè dei raggi che proiettano ogni punto del terreno che compare su entrambe le fotografie). Muovendo poi le fotografie nel loro insieme, si effettua il posizionamento del modello stereoscopico in modo che risulti in posizione corretta rispetto al sistema di riferimento dello strumento restitutore. Da ultimo si procede quindi al tracciamento della carta osservando stereoscopicamente le fotografie e tracciando i particolari naturali ed artificiali del terreno su di un supporto che varia a secondo del tipo di strumento restitutore usato. Nella fotogrammetria digitale

I restitutori ottici analogici sono strumenti che applicano un principio di funzionamento che simula il fenomeno della presa a cui, quindi, è analogo; l'analogia è di tipo meccanico e pertanto vengono detti restitutori analogici meccanici.

Sono formati da una struttura a supporti sui quali vengono messi i due fotogrammi; questi supporti sono i corrispondenti della camera da presa in due posizioni successive, cioè in corrispondenza di due punti di presa.

I raggi omologhi sono materializzati da due aste metalliche, una per ciascun fotogramma; un'estremità delle aste si trova, rispetto ai fotogrammi, nella stessa posizione che occupava il centro dell'obiettivo nella camera da presa; le altre due estremità convergono in un punto che corrisponde al punto di intersezione di una coppia di raggi omologhi; il corretto posizionamento delle aste, in modo che la loro intersezione rappresenti un punto del modello del terreno, viene effettuato mediante l'osservazione stereoscopica dei fotogrammi. Il restitutore è collegato a un tavolo su cui viene tracciato il disegno della carta.

Una classificazione rigorosa di questi strumenti, non la si può fare, dato che sono numerose e varie le loro caratteristiche.

Tuttavia, secondo le modalità di restituzione, si possono considerare i tre seguenti tipi:

- restitutori a doppia proiezione ottica, nei quali i raggi fra le immagini delle lastre e i punti del terreno sono realizzati mediante pennelli luminosi come nella presa senza alcun elemento meccanico interposto;
- restitutori a doppia proiezione meccanica, nei quali i raggi sono materializzati da aste metalliche che ruotano intorno a due snodi cardanici e si uniscono nel punto restituito; la parte ottica serve soltanto all'osservazione delle lastre, in modo che le estremità libere delle bacchette poggino sempre su due punti omologhi dei fotogrammi;
- restitutori a doppia proiezione ottico-meccanica, nei quali vengono impiegati foto-goniometri ed i raggi visuali sono realizzati all'interno da pennelli luminosi ed all'esterno da bacchette metalliche, i due cannocchiali dei due foto-goniometri, nell'esplorazione dei punti omologhi sulle lastre, si dispongono secondo i fasci dei raggi paralleli uscenti dagli obiettivi dei foto-goniometri e sono uniti da bacchette che si incontrano nel punto restituito.

Nei vari restitutori si possono distinguere quattro parti fondamentali:

- camere o porta lastre con i movimenti necessari per ripristinare il loro orientamento esterno;
- sistema ottico di osservazione: consente di collimare i punti omologhi sulle lastre oppure di determinare i punti di intersezione dei raggi omologhi luminosi;
- coordinatometro rappresentato da un carrello mobile secondo tre direzioni fra loro perpendicolari, che, mediante il punto di giunzione delle due bacchette o della marca di uno schermo, realizza i punti del modello ottico nello spazio del restitutore e consente di leggere o registrare le coordinate spaziali dei punti restituiti;
- coordinatografo, costituito da un tavolo con opportune guide, sul quale è posto un foglio da disegno, e da una matita, collegata ai movimenti orizzontali del carrello del coordinatometro mediante opportuni rotismi o pantografi per avere la carta in una determinata scala.

Nei restitutori a doppia proiezione ottica l'eventuale distorsione viene corretta con opportune lastre di vetro sagomate applicate allo strumento.

Il restitutore fotogrammetrico analitico è nato dall'accoppiamento di uno stereocomparatore con un calcolatore elettronico.

Lo stereocomparatore, introdotto sul mercato già a inizio '900, permetteva la misura in stereoscopia di un oggetto rappresentato sui fotogrammi mediante assi o squadre graduate. La determinazione topografica dell'oggetto sul terreno (cioè le coordinate assolute) invece doveva essere fatta manualmente con lunghi calcoli matematici.

La realizzazione di questo strumento per i calcoli è stata abbastanza complessa. Uno dei primi esemplari di restitutore fotogrammetrico analitico è stato quello prodotto in collaborazione tra la Bendix & C. di Detroit, per la parte elettronica, e la O.M.I. di Roma per la parte stereo-fotogrammetrica alla fine degli anni '50.

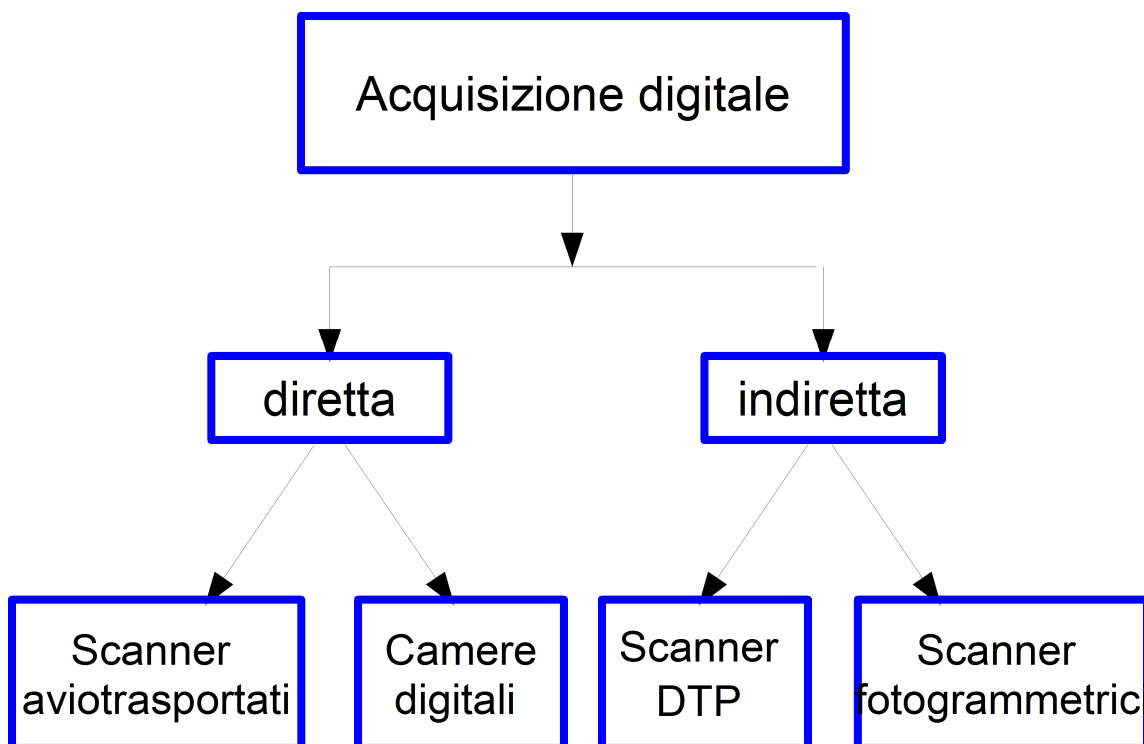
Gli strumenti analitici, più costosi di quelli analogici, permettono di automatizzare alcune operazioni e di conseguire una maggior precisione; non sono vincolati da parametri geometrici di presa, dato che questi valori sono introdotti solo numericamente nel calcolatore e non devono venire materialmente impostati come nei restitutori analogici. Con i restitutori analitici risultano molto agevoli le operazioni di triangolazioni aeree.

In genere un restitutore analitico è composto da un carrello porta lastre, un sistema ottico per la visione stereoscopica, due manovelle o volantini e un asta o pantografo per i movimenti di ricerca dei punti da collimare sulle foto, uno o più pedali per l'acquisizione dei punti e un calcolatore elettronico corredato da appositi software. Restituisce, dopo opportune collimazioni delle marche rilevate, correzione della diffrazione, orientamento relativo e rispetto ai punti fissi, la collimazione stereoscopica del punto prescelto, mentre il calcolatore restituisce le coordinate dei punti omologhi delle lastre. A questo punto lo strumento viene utilizzato per la restituzione per mezzo dei volantini e del pantografo.

Nella fotogrammetria digitale la misura tradizionale delle coordinate immagine è sostituita dall'identificazione del pixel all'interno della matrice, identificazione che, per quanto possibile, può essere fatta automaticamente. La qualità dell'immagine dipende da come sono state associate le coordinate e il rispettivo valore di radiometria all'immagine dal sistema di acquisizione (scanner, camere digitali). La risoluzione geometrica di una immagine digitale è legata alle

dimensioni del pixel ed è collegata alla risoluzione di acquisizione (densità di campionamento D). Indica il numero di pixel contenuti in una opportuna unità di lunghezza e viene espressa in dot per inch (dpi) o punti per pollice (numero di pixel contenuti un pollice = 25.4 mm). Una volta stabilita la risoluzione di acquisizione di un fotogramma è possibile calcolare la dimensione corrispondente del pixel secondo la relazione:  $d_{\text{pixel}}[\mu\text{m}] = 25400/D(\text{dpi})$ . Dalla risoluzione dell'immagine dipende la corretta visualizzazione dei particolari più piccoli e la precisione geometrica ottenibile durante le operazioni di orientamento e restituzione grafica.

Come già descritto, la risoluzione radiometrica di un immagine digitale è legata al numero di bit utilizzati per rappresentare il suo valore radiometrico e generalmente varia da 1 a 8 bit. Il numero di livelli rappresentabili è pari a  $2^{\text{(numero di bit per pixel)}}$ .



Schema 3: acquisizione digitale di immagini

Un'immagine con una risoluzione radiometrica di un 1 bit determina una rappresentazione binaria in cui i pixel possono assumere soltanto valori uguali a

0 (corrispondente al bianco) e 1 (corrispondente al nero). Un'immagine con una risoluzione radiometrica di 8 bit (1 byte) determina una rappresentazione con 256 livelli cromatici. Comunemente viene posto 0=nero e 255=bianco ottenendo valori intermedi che rappresentano le varie gradazioni di grigio (immagini a livello di grigio). L'immagine con una risoluzione radiometrica di 24 bit (3 byte) determina una rappresentazione con 16.7 milioni di colori (immagini RGB o true color). Ogni colore viene scomposto nelle tre componenti fondamentali (rosso, blu e verde) e a sua volta ciascun componente è suddiviso in 256 valori che variano da 0 (assenza di colore) a 255 (saturazione del colore).

Per utilizzare ai fini di misura un solo fotogramma è necessario che l'oggetto in esso rappresentato sia su un piano e che l'asse ottico della camera da presa sia risultato, all'istante della presa stessa, ad esso perpendicolare. Gli effetti prospettici, caratteristici nelle prese inclinate, modificano infatti la geometria dell'immagine variandone progressivamente il rapporto di scala. Per gli oggetti piani è comunque possibile effettuare il raddrizzamento da immagine prospettica. Il foto-raddrizzamento è un'elaborazione di un'immagine fotografica prospettica, che viene trasformata in un'immagine di tipo ortogonale, come fosse una fotografia presa dall'infinito perciò coi raggi proiettanti paralleli fra di loro e ortogonali al piano dell'immagine correggendo l'effetto prospettico indotto dalla non perpendicolarità della presa e riportandola alla scala scelta. L'operazione di raddrizzamento può essere effettuata sia con procedimento proiettivo grafico, sia con procedimento fotomeccanico ed oggi attraverso il calcolo numerico di raddrizzamento digitale. Le relazioni proiettive tra due piani diversi richiedono la conoscenza della posizione di almeno quattro punti non allineati dell'oggetto interessato. Questo sarà comunque anche una delle condizioni per il funzionamento corretto della tecnica oggetto di questa tesi. Un numero maggiore di punti, porta ad una risoluzione del sistema attraverso il metodo di compensazione a minimi quadrati. Per l'operazione di "stiramento" dell'immagine, è facile intuire come tali punti debbano preferibilmente essere individuati ai bordi dell'immagine stessa, in modo che il perimetro definito attraverso la loro elaborazione racchiuda la superficie più ampia possibile. Si osserva che punti localizzati nelle zone centrali dell'immagine hanno uno scarso significato nel procedimento di raddrizzamento. Significativo è invece il

raddrizzamento differenziale (orto-foto), nel caso di oggetti morfologicamente diversi dal piano, sviluppati cioè in profondità o altezza, quando lo spostamento d'altezza risulti nel suo complesso trascurabile. Quando, per ricostruire l'immagine completa dell'oggetto, sia necessario utilizzare più fotogrammi, si procede raddrizzando singolarmente ciascuna di queste immagini e successivamente alla "mosaicatura" delle stesse per ricomporre un'unica rappresentazione ortogonale dell'oggetto ripreso.

A queste procedure segue un lavoro di foto-ritocco, per eliminare eventuali repentine variazioni di luminosità e contrasto che si colgono sui profili di giunzione di immagini diverse. Questa tecnica, per oggetti piani, o riconducibili a piani, permette di ottenere una rappresentazione completa bidimensionale dell'oggetto. Questa tecnica è utilizzata principalmente per il rilievo di prospetti di edifici e di superfici che, entro certi limiti, possono essere considerate piane. Per applicare o meno ad un certo oggetto la pratica del raddrizzamento è necessario calcolare sulla superficie l'errore in metri/centimetri che si commette nel trascurare la sua non planarità.

Per il raddrizzamento è preferibile usare camere a piccolo campo, oppure utilizzare solo la parte centrale dei fotogrammi presi con camere grandangolari. Nel raddrizzamento si può fare una valutazione dell'errore, accentuando un errore massimo ammissibile pari ad uno spostamento di poco più di un millimetro al bordo del fotogramma. In questo caso si vede che gli errori sono accettabili metricamente, per irregolarità morfologiche, quando non superano l'1% della distanza media di presa.

Questa valutazione è utile al fine di definire l'accettabilità del dato rilevato finale rispetto al dato reale. Superfici con irregolarità morfologiche superiori a tali limiti debbono essere raddrizzate per porzioni, considerando separatamente più piani elementari.



## **TERMOGRAFIA E MACCHINE TERMOGRAFICHE**

La termografia è una tecnica moderna, innovativa e non invasiva per visualizzare il profilo termico di un corpo (Yang & Yang, 1992; Spruyt et al., 1995); il maggior vantaggio di questo metodo è che non richiede un contatto fisico diretto con la superficie oggetto di analisi, permettendo una lettura remota della distribuzione della temperatura (Speakman e Guard 1998).

Le immagini sono solitamente rappresentate in scale di falsi colori, nelle quali a un certo colore corrisponde una determinata temperatura e non il colore reale dell'oggetto.

La termografia è una tecnica di analisi non distruttiva che si basa sull'acquisizione delle immagini nel campo dell'infrarosso. Esistono due modalità di applicazione della termografia: quella per TELERILEVAMENTO e la quella a contatto.

In particolare consiste nel telerilevamento delle differenze di temperatura superficiale e dei relativi gradienti, realizzato mediante emulsioni termosensibili o apparecchi elettronici con presentazione video dell'immagine termica e utilizzato in campo tecnico, militare e clinico.

Difatti la termografia per telerilevamento trova impiego principalmente in edilizia, mentre la termografia a contatto si basa sull'utilizzo di rivelatori a cristalli liquidi e trova prevalentemente impiego in campo medicale.

Con il termine termografia si intende la visualizzazione bidimensionale della misura di irraggiamento. Attraverso l'utilizzo di una termocamera (strumento per eseguire controlli di tipo termografico) si eseguono controlli non distruttivi e non intrusivi. Le termocamere rilevano le radiazioni nel campo dell'infrarosso dello spettro elettromagnetico e compiono misure correlate con l'emissione di queste radiazioni.

Questo strumento è in grado di rilevare le temperature dei corpi analizzati attraverso la misurazione dell'intensità di radiazione infrarossa emessa dal

corpo in esame. Tutti gli oggetti ad una temperatura superiore allo zero assoluto (-273°C) emettono radiazioni nel campo dell'infrarosso.

La termografia permette di visualizzare valori assoluti e variazioni di temperatura degli oggetti, indipendentemente dalla loro illuminazione nel campo del visibile. La quantità di radiazioni emessa aumenta proporzionalmente alla quarta potenza della temperatura assoluta di un oggetto.

La correlazione tra irraggiamento e temperatura è fornita dalla legge di Stefan-Boltzmann:

$$(f.11) \mathbf{q} = \boldsymbol{\varepsilon} \times \boldsymbol{\sigma} \times \mathbf{T}^4$$

ove  $\boldsymbol{\sigma}$  è la costante di Stefan-Boltzmann e vale  $5,6703 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ ,  $\boldsymbol{\varepsilon}$  è l'emissività della superficie emittente (variabile tra i limiti teorici 0 e 1) e  $\mathbf{T}$  è la sua temperatura assoluta.

Inoltre, la legge di Wien stabilisce come la temperatura degli oggetti determini in modo univoco la regione dello spettro elettromagnetico dove si ha la massima emissione di radiazione

$$(f.12) \boldsymbol{\lambda}_{max} \times \mathbf{T} = \text{costante}$$

La termografia consente di individuare anomalie nell'emissione dell'energia da superfici piane e oggetti tridimensionali e quindi, a parità di emissività, rileva le anomalie termiche presenti.

Consentendo la misura a distanza di temperature comprese in un ampio range (-300°C/ 900°C), la termovisione è normalmente utilizzata per il controllo di tutti quei processi che non consentono l'avvicinamento, come, ad esempio, i processi di fusione e raffreddamento nell'industria siderurgica.

La risoluzione di un termogramma può essere molto elevata ( $\pm 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$ ) e consentire l'individuazione precoce di danni, alteranti le proprietà termiche, di qualsiasi macchina o materiale. Per questo viene quindi utilizzata per la prevenzione di incidenti e rotture in quadri elettrici, apparati industriali,

condutture, etc..

In ambito architettonico e del rilievo, la termografia è attualmente utilizzata per la ricerca di strutture nascoste alla vista, come travi, riempimenti di materiale diverso da quello originario, opere di restauro, oppure per la diagnostica di infiltrazioni di umidità. La termografia è già utilizzata per individuare qualitativamente le zone umide soggette a traspirazione come zone più fredde, a causa del calore ceduto dall'acqua nella transizione dalla fase liquida a quella di vapore. Infatti, l'energia associata a questa trasformazione (calore latente di evaporazione) è notevole (540 calorie per ogni grammo di acqua evaporata), se paragonata agli altri processi di scambio energetico che possono naturalmente interessare una superficie muraria (non esposta ai raggi diretti del sole).

Poiché il flusso evaporativo è responsabile del trasporto e del deposito di sali alla superficie di una muratura (efflorescenze e sub-florescenze), la termografia permette di ottenere una mappatura delle zone maggiormente a rischio di degrado, contribuendo quindi ad aggiungere dati all'analisi del degrado del bene indagato.

In riferimento all'individuazione di strutture murarie non riscontrabili dall'esame a vista, una termocamera è in grado di evidenziare le diverse risposte in temperatura causate da differenze di conducibilità e di capacità termiche tra materiali posti all'interno delle pareti. Per questo tipo di indagine è solitamente necessaria una sollecitazione termica, per ovviare alla capacità dei materiali di raggiungere l'equilibrio termico con l'ambiente, ossia quando i suoi materiali costituenti si trovano alla medesima temperatura.

La termografia, come tutte le altre prove non distruttive consente:

- di poter operare all'interno degli edifici e dei locali senza dover sospendere le normali attività e limitando al minimo i disagi per gli abitanti;
- di evitare ulteriori traumi a strutture dissestate, rendendo circoscritto e localizzato il numero dei saggi distruttivi ai punti realmente rappresentativi per la formulazione del quadro diagnostico generale.

L'energia radiante è funzione della temperatura superficiale dei materiali e questa è a sua volta condizionata dalla conducibilità termica e dal calore

specifico.

Questi ultimi esprimono in termini quantitativi l'attitudine del materiale stesso a trasmettere il calore o a trattenerlo. Un materiale con valori alti di conducibilità si riscalderà velocemente ed altrettanto velocemente si raffredderà.

Per effetto dei differenti valori di questi parametri, specifici per ciascun materiale, i diversi componenti di un manufatto, quale una muratura, assumeranno differenti temperature sotto l'azione di sollecitazioni termiche. Tale caratteristica è sfruttata dalla termografia per visualizzare, con appositi sistemi, i differenti comportamenti termici dei materiali. Ad oggi è abitualmente utilizzato su superfici a vista.

Grazie alla termografia si possono evidenziare ad esempio:

- dispersioni termiche dovute a deficienze di coibentazione;
- ponti termici;
- umidità nelle murature;
- presenza di solai in calcestruzzo armato o di elementi di tipo differente al di sotto degli intonaci;
- presenza di canalette di impianti elettrici e/o canalizzazione di impianti idrico-sanitario e termico in funzione;
- ammorsature tra strutture murarie con tessiture e materiali diversi.

Per quanto sopra, la termografia è influenzata dalle condizioni ambientali e climatiche del luogo in cui si opera.

Pertanto occorre rispettare alcune regole generali per ottenere risultati corretti:

- operare in assenza di irraggiamento solare diretto, meglio se dopo il tramonto quando la struttura da analizzare è in fase di raffreddamento;
- operare in assenza di pioggia battente e di vento forte.

La temperatura, l'umidità e la velocità del vento influenzano la qualità dei risultati, in quanto essi modificano le modalità con cui avviene lo scambio termico tra materiali e l'ambiente circostante.

Pertanto è necessario avere un controllo/misurazione strumentale di questi fattori. È necessario inoltre che a cavallo della struttura vi sia uno sbalzo termico di almeno 7-10 °C al fine di apprezzare sui termogrammi le anomalie

termiche eventualmente presenti.

È importante infine tenere in considerazione la presenza di sorgenti calde, quali tubazioni non coibentate o elementi scaldanti, che possono influenzare la distribuzione di temperatura sui componenti l'involucro, e i riflessi provenienti da altre superfici che potrebbero essere scambiati per difetti della struttura.

Fondamentale quindi è la stabilità delle condizioni ambientali per identificare, in ambiente interno, le eventuali fonti di interferenza.

Un sistema termografico IR è costituito da una telecamera collegata ad un sistema di elaborazione e registrazione delle immagini termiche.

L'acquisizione delle immagini avviene nel campo dell'infrarosso, cioè delle onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda oltre il rosso dello spettro del visibile, a lunghezze d'onda comprese tra 0.7 e 13  $\mu\text{m}$  di cui si sfrutta in genere il campo 3 – 5  $\mu\text{m}$  e 8 – 12  $\mu\text{m}$  rispettivamente per i sensori definiti "short range" e "long range".

I rilevatori IR hanno il compito di individuare la consistenza della radiazione che li investe e di analizzare punto per punto la superficie radiante, per giungere alla definizione della mappa termica.

I sistemi termografici attualmente in commercio si differenziano per le diverse modalità di raffreddamento:

- termoelettrico o effetto Peltier;
- azoto Liquido in vaso di Dewar;
- argon pressurizzato in bombola (Joule - Thomson)
- ciclo chiuso Sterling.

Il sistema di raffreddamento più efficace, per applicazioni della termografia in edilizia è quest'ultimo, costituito da una pompa a pistola capace di cercare un punto freddo in un circuito sigillato con carica di elio.

Per l'acquisizione di dati utili esistono molti accorgimenti, come quello del nastro adesivo isolante, con emissività vicina a quella del corpo nero, al fine di ricavare, in riferimento ad esso, le emissività degli altri oggetti inquadrati ed indagati.

Altra possibilità, in caso di temperature vicine all'equilibrio termico, è quella di effettuare un pre-riscaldamento di uno dei due ambienti adiacenti all'oggetto-parete da rilevare, attraverso l'uso di una fonte direzionata di calore.

## **I SENSORI, I SENSORI TERMICI, L'USO NELLA TERMOGRAFIA E L'ACQUISIZIONE DEL DATO**

I sensori si suddividono in due grandi gruppi: sensori attivi e sensori passivi.

I sensori passivi sono strumenti che rilevano la radiazione elettromagnetica naturale, come il sole, riflessa od emessa da fonti naturali. Registrano solo l'energia che è disponibile naturalmente. Per l'energia riflessa la registrazione avviene solo quando il sole illumina la Terra (di notte non c'è energia riflessa disponibile). Per quella emessa naturalmente, come quella dell'infrarosso termico, la registrazione può avvenire di giorno e/o di notte, purché la quantità di energia sia sufficiente da essere registrata.

Di contro sensori attivi generano un segnale che "illumina" l'oggetto e ne registrano l'eco/segnale di ritorno. Il sensore attivo è il Radar ad Apertura Sintetica (SAR) ad esempio emette la radiazione che è diretta verso l'oggetto da osservare. La radiazione riflessa dall'oggetto è registrata e misurata dal sensore. I sensori attivi permettono di ottenere misure in ogni momento, senza alcuna interferenza dovuta al momento del giorno o della stagione. Richiedono la generazione di una enorme quantità di energia per illuminare adeguatamente l'oggetto. Un sensore non è mai uno strumento indipendente e fa parte di un sistema più ampio, che comprende altri rilevatori, registratori per i dati, memorie di sistema o esterne, condizionatori di segnale e attuatori. I sensori sono quasi sempre disposti su piattaforme e possiamo classificarli: in base allo "stimolo rilevato"; distinguendoli sono attivi o passivi; in base alla piattaforma su cui alloggiato. Possiamo elencare: satelliti, velivoli, veicoli a motore, stazioni fisse e mobili a terra, stazioni fisse nel sottosuolo, stazioni sotto la superficie marina.

I sensori termici sono dei sensori passivi che rilevano l'emissività dei materiali inquadrati. Il dato rilevato è pertanto influenzato da numerosi fattori, quali le condizioni di temperatura del mezzo (in genere aria, in esterno o in ambiente interno), l'umidità relativa del mezzo e dell'ambiente, la presenza o meno di soleggiamento diretto, la differenza di temperatura tra oggetto rilevato e mezzo,

la distanza tra sensore e oggetto rilevato, l'inclinazione del "raggio" di presa, e una serie di altri fattori che saranno analizzati e descritti nello specifico in capitoli successivi. Il funzionamento della termocamera si basa quindi sulla rilevazione dei raggi nel campo dell'infrarosso. Pur con notevoli limiti dal punto di vista della restituzione geometrica del dato rilevato, che è influenzata, oltre che dai fattori sopra elencati, anche dalla dimensione dell'immagine in pixel che viene effettuata, i campi nei quali è già stata utilizzata a livello qualitativo sono numerosi e riguardano molti settori: medico, edile, impiantistico, veterinario, etc.

La termografia viene ampiamente utilizzata nel settore edilizio e impiantistico. Si elencano sinteticamente alcuni settori con relativi temi di indagine.

Analisi storica: ricostruzione storica, elementi nascosti e/o incorporati in fasi successive, elementi in pietra (archi, capitelli, portali ..), tamponature (finestre, porte), tessiture murali, ammorsamenti tra edifici. In questo senso la differente emissività di elementi apparentemente identici aiuta l'identificazione delle fasi costruttive storiche, senza intaccare l'oggetto.

Analisi statica: tipologie di muratura e materiali costituenti, suddivisione di elementi strutturali (pilastri architrave, archi di scarico...), strutture lignee (solai, travi...), fratture e fessurazioni passanti, elementi metallici (staffe, chiavi, grappe, chiodi).

Analisi impiantistica: presenza sottotraccia di tubazioni idriche o termiche, canne fumarie, impianti civili.

Analisi su elementi termo-idrici: anomalie termiche correlate a cicli idrodinamici, ponti termici, condensazione/evaporazione, risalita capillare, infiltrazioni di acqua e umidità.

Analisi sugli elementi di copertura: intonaci parietali, affreschi, mosaici, individuazione dei distacchi, controllo di adesione, prima e dopo il restauro, dei paramenti e degli affreschi.

Analisi del degrado: controllo in tempi diversi dello stato di degrado correlato con tutte le informazioni disponibili alla tecnica.

I sensori hanno numerose funzioni, che, opportunamente tradotte in immagini e dati termici e di emissività, possono dare contributi alle volte sostanziali nei



seguenti casi.

A) Catturano la radiazione elettromagnetica riflessa (ma anche emessa) da un oggetto posto sulla superficie terrestre.

B) Convertono la radiazione in un segnale elettrico.

C) Dalla generazione del segnale elettrico, proporzionale alla quantità di energia elettromagnetica che giunge al sensore, vengono prodotte immagini (registrazione dei valori discreti di Digital Number associati all'unità indagata). Si ottiene solitamente una immagine digitale, una matrice di valori discreti. L'intensità di ciascun pixel corrisponde alla radianza media, misurata elettronicamente, dell'area a terra corrispondente a ciascun pixel; Questa è una matrice di 6x6 righe e colonne. I 36 valori di Digital Number (DN) corrispondono alla radianza media di ciascun pixel;

La rappresentazione della distribuzione delle energie di radiazione può essere fatta in funzione sia della lunghezza d'onda, sia della frequenza in un grafico, denominato spettro elettromagnetico. Per opportunità di analisi, lo spettro è suddiviso in regioni, ognuna delle quali comprende determinate lunghezze d'onda (o frequenze). Lo studio di una determinata superficie avviene analizzando il suo comportamento in differenti lunghezze d'onda, in vari campi dello spettro elettromagnetico. Il singolo sensore è progettato per operare in una o più bande dello spettro. La regione compresa tra 0,4  $\mu\text{m}$  (violetto) e 0,7 (rosso)  $\mu\text{m}$  può essere percepita dall'occhio umano (visibile), il picco di sensibilità dell'occhio umano è infatti 0,55  $\mu\text{m}$ . La regione tra 0,01  $\mu\text{m}$  e 0,4  $\mu\text{m}$  è definita ultravioletto e invece la regione sopra il rosso, compresa tra 0,7  $\mu\text{m}$  e 1000  $\mu\text{m}$  è invece chiamata dell'infrarosso. La parte dell'infrarosso compresa tra 7  $\mu\text{m}$  e 15  $\mu\text{m}$  è relativa all'emissione termica dei corpi "caldi" ed è quindi definita infrarosso termico, tale radiazione emessa dalla terra può essere quindi misurata in forma di calore.

La firma spettrale è un grafico che rappresenta le capacità di riflessione di una determinata superficie, in funzione della lunghezza d'onda della radiazione

incidente. La quantità di radiazione elettromagnetica riflessa (ma anche assorbita e emessa) da un oggetto dipende dalla sua composizione chimica, dallo stato fisico e dalla sua temperatura. Varia al variare della lunghezza d'onda. Misurando l'energia riflessa dagli oggetti alle diverse lunghezze d'onda è possibile costruire la loro curva o firma spettrale. Ogni oggetto e materiale ha una sua unica firma spettrale, grazie alla quale può essere identificato. La risposta, che il sensore è in grado di captare, è rappresentabile in termini grafici, come una capacità di riflessione di un oggetto alle diverse lunghezze d'onda.

## **STATO DELL'ARTE – INDAGINI TERMOGRAFICHE PER I BENI CULTURALI E FOTOGRAMMETRIA**

Relativamente alle indagini diagnostiche eseguite con l'ausilio o l'integrazione del dato termico, esistono alcune trattazioni che elencheremo di seguito.

Il dato fondamentale però resta quello che nessuna ricerca è ancora stata pubblicata alla data di stesura della presente trattazione, che indichi con quali metodi, tecniche, modalità e procedure si possa definire “utile” e utilizzabile il dato geometrico rilevato indirettamente, ovvero quello che emerge da un'analisi del supporto sottostante l'intonaco di finitura, senza l'eliminazione dello strato stesso.

Occorre comunque riassumere brevemente quanto è stato già studiato e pubblicato, oltre che esposto in conferenze nazionali e internazionali, in quanto costituisce una base, sia di metodo sia di tecniche, per poter proseguire nell'analisi di tipo quantitativo obiettivo di questo studio.

Sono state consultati a questo scopo molte pubblicazioni del QIRT Quantitative InfraRed Thermography, una conferenza internazionale che si svolge con cadenza biennale in Francia (sede ultima dell'anno 2012 a Napoli, prossima conferenza 2014 in Francia a Bordeaux) e che si pone come obiettivo quello di ottenere un confronto sugli studi, le ricerche, le applicazioni del metodo termografico e dell'indagine termografica in vari campi e settori:

- fluidodinamica e energetica
- applicazioni su micro-scala
- firma infrarosso e i.r. multi-spettrale
- termo-meccanica
- vibro-termografia
- test e analisi non distruttivi, anche applicati a strutture composite
- applicazioni industriali

- immagine termica ed elaborazione dei dati
- ambiente
- termografia a induzione
- costruzioni civili e opere di ingegneria
- calibrazione e metrologia
- applicazioni biomedicali
- termo-fisica
- monitoraggio e manutenzione

In questa sede sono stati considerati con particolare attenzione gli studi relativi alle costruzioni civili e ingegneristiche e alle attività di calibrazione e metrologia.

Segue la definizione dei parametri rilevati dai sensori termici:

•Spettrale:

indica il numero di bande di acquisizione e la loro ampiezza. Migliore è la risoluzione spettrale, più sottile è l'intervallo di lunghezze d'onda per una particolare banda.

•Radiometrica: rappresenta la minima differenza di intensità che un sensore può rilevare tra due valori di energia raggianti. Ogni volta che una immagine è acquisita su un film o da un sensore, la sua sensibilità alla grandezza dell'energia elettromagnetica determina la risoluzione radiometrica. Migliore è la risoluzione radiometrica di un sensore, più sensibile è nel registrare piccole differenze nell'energia riflessa o emessa.

•Geometrica: dimensioni dell'area elementare al suolo di cui si rileva l'energia elettromagnetica. E' l'area minima sul terreno vista dallo strumento da una data altezza ad un dato istante e viene rappresentata dalla dimensione dell'elemento di superficie riconoscibile in una immagine registrata

• Temporale: periodo di tempo che intercorre tra due riprese successive di una stessa area.

# LO STATO DELLA RICERCA SUL TEMA SCELTO

## SEZIONE DEDICATA ALLA TERMOGRAFIA

Di particolare utilità e interesse sono risultati gli studi descritti e commentati di seguito.

*“In-situ emissivity measurement of construction materials”*

*di C.Ciocia e S.Marinetti*

*ITC-CNR Padova*

Lo studio mostra come si possano identificare materiali differenti in base alla loro emissività e come questi materiali risultino, entro certi limiti, univocamente e correttamente identificati. Lo studio infatti ha evidenziato come sia stato possibile distinguere tre materiali (carta bianca, carta nera, alluminio) in base alla differente scala di grigi dell'immagine termica rilevata.

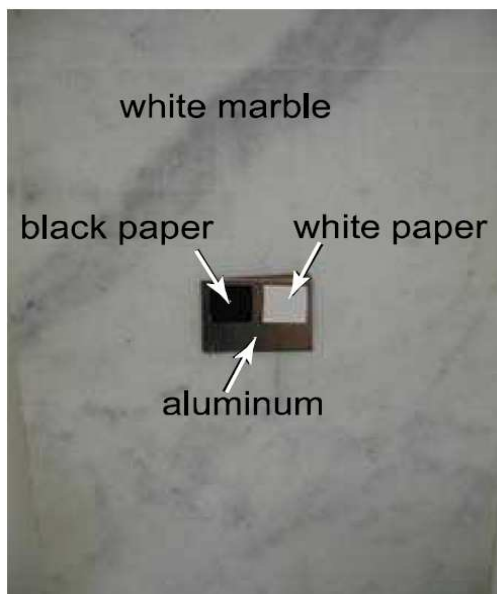


Immagine 6: immagine di target su lastra di marmo.

Ad ogni tonalità di grigio è stata fatta corrispondere un'emissività, che ha consentito di identificare il materiale (vedi definizione e caratteristiche dell'emissività, come sopra descritto).

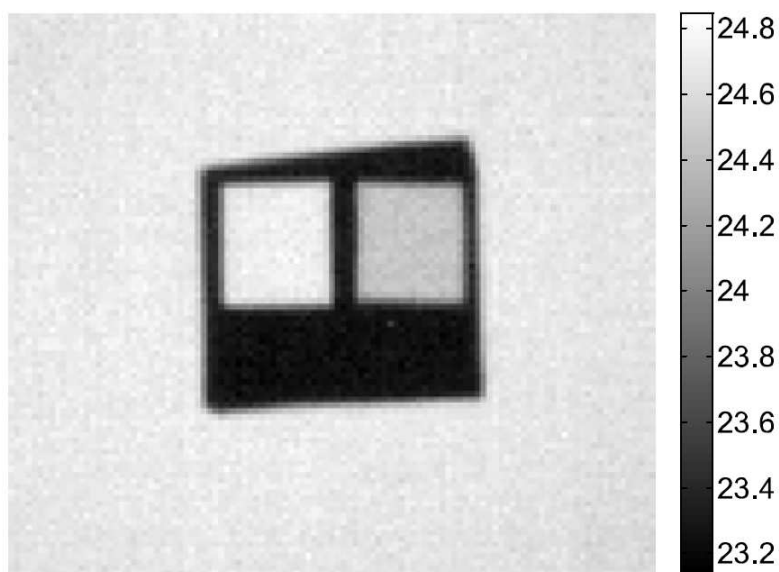


Immagine 7: immagine termica di target su lastra di marmo.: si distinguono le emissività differenti di foglio nero e foglio bianco

Ai fini della presente trattazione, suddetto studio è stato utilizzato in particolare per progettare, testare e verificare la creazione del pannello di calibrazione, da utilizzare per acquisire le immagini termiche (in b/n o scala di grigi) che sono state poi elaborate dal programma di raddrizzamento fotogrammetrico. Infatti il pannello di calibrazione in materiale metallico, per quanto corretto dal punto di vista della trattazione teorica, ha presentato, nella sua realizzazione pratica, notevoli problemi dovuto alla forte rifrazione che i materiali metallici hanno se esposti alla luce (naturale o artificiale). Si sottolinea nuovamente che obiettivo del presente studio è l'individuazione di un sistema "low-cost", che consenta una semplice, rapida e corretta acquisizione dei dati, elaborazione e post elaborazione, ma di facile realizzabilità e di costo ragionevolmente contenuto.

*“Geometrical correction and photogrammetric approach in a thermographic inspection of building”*

*di P.Bison, A.Bortolin, G.Cadelano, G.Ferrarini, K.Furlan, E.Grinzato*

*ITC-CNR Padova*

Lo studio, a partire dalla calibrazione della camera termica, ha come obiettivo quello di ottenere una corretta restituzione tridimensionale di un oggetto (edificio tipo per le prove e i test, con applicazione anche in un edificio storico – Chiesa di San Vito di Riviera) e una corretta collocazione spaziale degli oggetti edilizi termo-graficamente rilevati.

Con suddetto rilievo è stato possibile ottenere la restituzione grafica tridimensionale, geometricamente corretta, che riportasse parte degli elementi significativi, quali le strutture, parti di superfici degradate. Uno dei problemi sottolineati è l'effetto della distorsione della camera termica, che altera geometricamente gli oggetti. Lo studio sottolinea poi come i sistemi commerciali in uso siano inadeguati alla risoluzione di detto problema, anche a causa dei numerosi fattori variabili (temperatura degli oggetti alle differenti condizioni del rilievo, necessità di integrare il rilievo termico con altri tipi di rilievo topografico come il laser scanner) che influiscono l'acquisizione dell'immagine termica e la sua post elaborazione.

*“Numerical method of active thermography for the reconstruction of back wall geometry”*

*R.Richter, C.Maierhofer, M.Kreutzbruck, M.Schilling*

*F.I.M.R.T. Berlin Germany*

L'articolo propone un metodo numerico per indagare e classificare i difetti e le disomogeneità utilizzando la termografia attiva. Lo studio è riuscito a ricostruire, a mezzo della termografia, la geometria bidimensionale (spessori) di un provino in PVC, anche nella sua parte retrostante.

Questo studio è utile soprattutto per comprendere il dato che viene “restituito” dall'immagine termica, facilitandone la comprensione e la “trasformazione” in un dato geometrico utile.

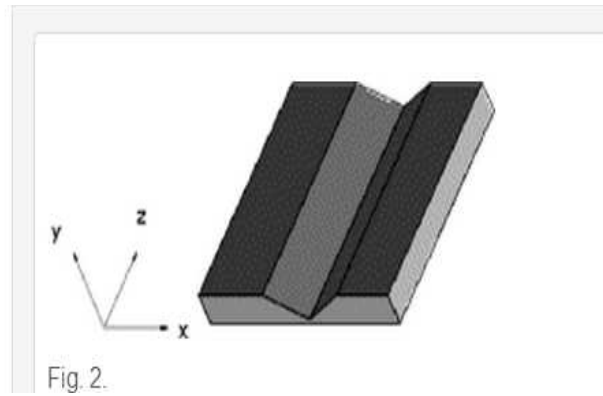


Immagine 8: elemento tridimensionale oggetto dello studio

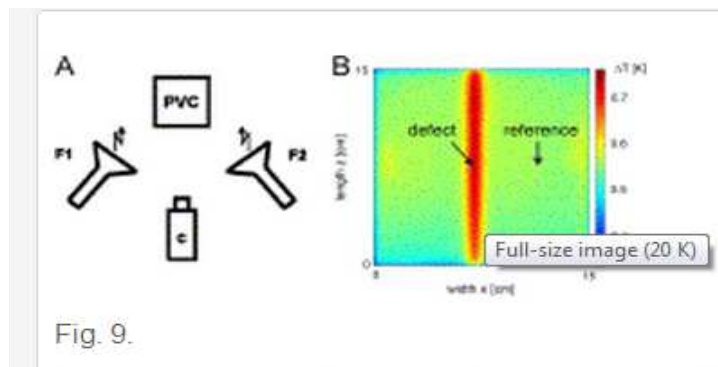


Immagine 9: immagine termica di che mostra lo spessore rilevato e identifica la presenza di una forma geometrica

*La presente tesi infatti ha come obiettivo quello di definire geometricamente l'orditura della superficie sottostante un intonaco o un affresco di spessori contenuti.*

*“An experimental method for the transient infrared inspections in situ of historical building”*

*C.Cervino, F.Fantozzi, S.Filippeschi, T.Santini*

*Università di Pisa*

Lo studio può ottenere informazioni quantitative sui materiali nascosti sotto gli strati di intonaco. Osservando l'immagine ad infrarossi durante il passaggio di calore che avviene durante il riscaldamento del muro, compaiono pietre,



mattoni o materiali diversi sulla immagine, in momenti differenti, a seconda della loro diffusività termica, che è differente da quella di una malta di riferimento.

L'analisi numerica è stata effettuata applicando manualmente il metodo agli elementi finiti e i principali risultati sono stati confrontati con quelli ottenuti con un programma commerciale agli elementi finiti.

Questo studio conferma la possibilità di poter identificare i vari materiali presenti al di sotto di un intonaco e darne anche, entro certi limiti, caratteristiche tecniche e tecnologiche. Null'altro comunque indica relativamente alle condizioni al contorno che potrebbero andare ad alterare il risultato percepito, essendole prove state eseguite in "ambiente" isolato, ovvero in laboratorio.

*"Calibration and verification of thermographic cameras for geometric measurement"*

*S.Lagueta, H.Gonzalez-Jorge, J.Arnesto, P.Arias*

*University of Vigo Spain*

Lo studio presenta una procedura di calibrazione della termocamera, al fine di riuscire a definire l'accuratezza geometrica, la ripetibilità della misurazione e la deviazione della misurazione indiretta dal valore corretto misurabile direttamente. La procedura di calibrazione viene effettuata mediante la costruzione di un pannello di calibrazione su supporto plastico.

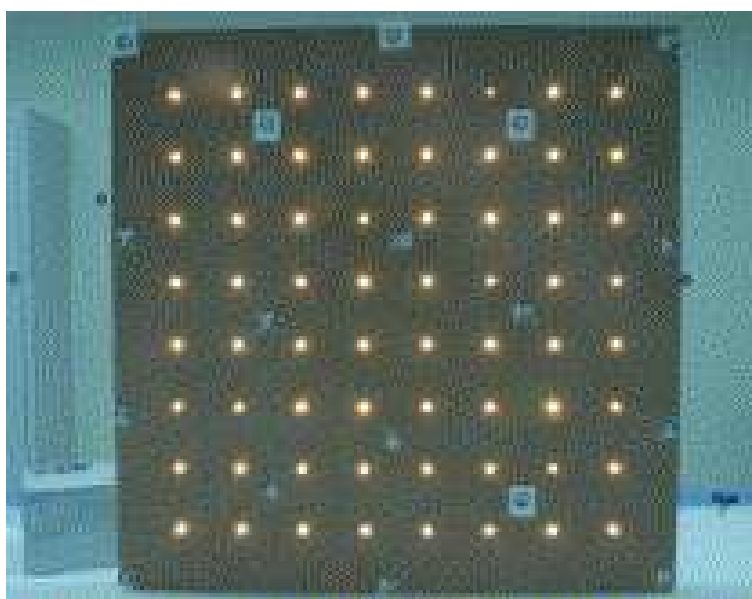


Immagine 10: immagine termica del pannello di calibrazione

È stato eseguito il rilievo mediante generazione di contrasto termico per 4 pietre diverse durante un riscaldamento di tipo convettivo. I materiali differenti si distinguono nella scala di grigi.

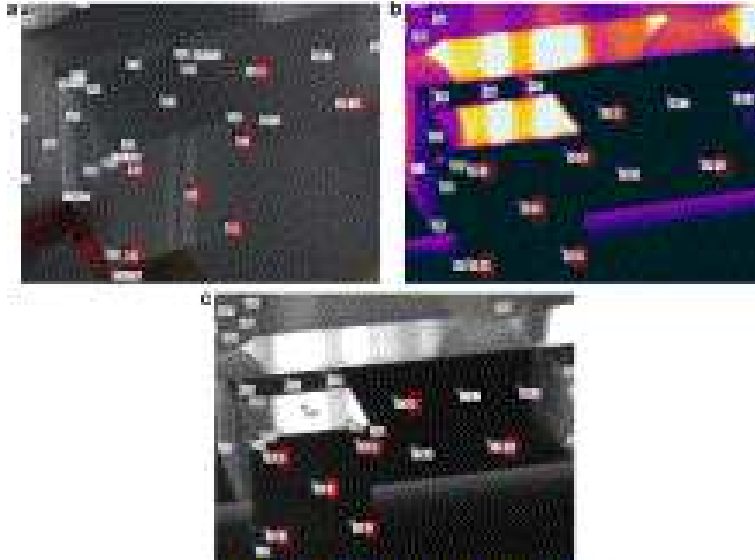


Immagine 11: identificazione di punti omologhi sulle immagini termiche in ripresa dall'alto.

## **SEZIONE DEDICATA ALLA FOTOGRAMMETRIA**

La trattazione scientifica sulla fotogrammetria è davvero ampia e difficilmente sintetizzabile in un capitolo. La materia è estremamente vasta e studiata per innumerevoli utilizzi in altrettanti settori. È opportuno quindi circoscrivere la trattazione all'uso della fotogrammetria per il rilievo dei beni culturali e degli edifici, così come da ultimi studi e risultati proposti.

La fotogrammetria è una tecnica di rilievo nel campo dei beni culturali moderna e rigorosa. È una tecnica che non richiede il contatto con l'oggetto, di acquisizione rapida, flessibilità di impiego, precisione nella determinazione metrica della geometria e della forma di oggetti di ogni tipo. Nel rilevamento dei beni culturali ha un ruolo più diffuso la fotogrammetria dei vicini, ma certo l'aerofotogrammetria a grandissima scala (1:500-1:200), utile per la redazione di cartografie speciali per centri storici, edificati di valore architettonico e storico, sistemi di fortificazione, siti archeologici.

Accanto ai tradizionali strumenti analitici, si sono diffusi sistemi di fotogrammetria digitale a basso costo, basati su personal computer, che sfruttano una semplificazione nelle procedure e nelle interfacce verso l'utente. Tra essi sono molto utilizzati i sistemi stereoscopici e quelli monoscopici multi-immagine. Per questi ultimi, nonostante i minori requisiti in termini di risorse hardware, ma che richiedono una notevole semplicità d'uso, si procede, con strumenti software, a semplificare la fase di collimazione dei punti e delle entità omologhe. Per la fase di acquisizione dei dati primari, nel 1994 Waldhausl e Ogleby pubblicavano le note regole del "3 per 3", riferendosi a prese di beni culturali con camere non metriche e dispositivi di misura semplici, alla portata di tutti, per dare luogo alla creazione di archivi con una qualche valenza metrica. Queste soluzioni sono rese possibili soprattutto grazie alle moderne tecniche di calcolo, in primo luogo la compensazione a fasci proiettivi. La grande diffusione di questa tecnica ha consentito di ottenere una buona quantità di dati, geometricamente corretti e qualitativamente di buone caratteristiche.

La crescita della automatizzazione delle procedure di elaborazione e restituzione, è dipesa dai progressi derivati dalle connessioni che si sono stabilite tra la fotogrammetria ed altri settori disciplinari che operano sulla analisi di immagine. Stessa cosa si può dire per gli aspetti legati alla modellazione tridimensionale ed alla realizzazione di prodotti finali indagabili metricamente e utilizzabili nella realtà virtuale. Questo può avvenire mediante la sovrapposizione delle immagini fotografiche ad un modello tridimensionale.

Nelle orto-foto il dato fotografico, quando referenziato dal punto di vista geometrico, è ricco di informazioni, non solo metriche, anche più di quelle che si potrebbero ottenere con il tradizionale rilievo a matita. Per il raddrizzamento differenziale è necessaria la disponibilità di modelli digitali di alta qualità delle superfici da rappresentare, che danno origine a modelli realizzabili con tecniche proprie della fotogrammetria digitale o con l'integrazione con le altre tecnologie oggi ampiamente in uso.

## **SEZIONE DEDICATA ALL'INTEGRAZIONE DELLE TECNICHE**

Di seguito si riportano alcuni schemi che rappresentano le integrazioni di tecniche di rilievo più diffuse, utilizzate e sperimentate nel settore dei Beni Culturali e Architettonici. La schematizzazione non intende essere esaustiva, ma indicare le integrazioni di tecniche di maggior interesse.

Nota generale per l'interpretazione-lettura dello schema: nel riquadro interno è indicato l'oggetto o il campo di rilievo, le riquadro esterno sono riportate le due o più tecniche che vengono utilizzate per ottenere l'integrazione dei dati del tipo di prodotto finale.

Tipo 1

**Rilievo di siti Archeologici**  
**Modellazione tridimensionale**  
**multiscala mappata**

Laser scanning  
terrestre

Fotogrammetria

**Bene-sito archeologico**  
**cittadino**  
**porzione di quartiere**

Fotogrammetria classica  
Rilievo di tipo tradizionale

Laser scanner con  
geo-referenziazione

Tipo 2

Tipo 3

**Porzione di edificio o**  
**elemento**  
**architettonico** **di**  
**particolare pregio**

Laser scanner 3D  
Geo-referenziazione "locale"

Fotogrammetria  
classica

**Rilievo di Beni Culturali  
vincolati  
Modellazione  
tridimensionale**

Fotogrammetria classica  
Rilievo di tipo tradizionale

Laser scanner  
terrestre con geo-  
referenziazione

Tipo 4

**Interni di edifici di valore-pregio  
storico restituzione  
tridimensionale**

Stereo fotogrammetria

Laser  
scanning

Tipo 5

**Manufatti e dipinti  
Storico archeologici**

Termografia infrarosso

Spettrografia di  
massa e analisi  
multispettrali

Tipo 6

**Rilievo di siti  
Archeologici  
Siti sepolti**

Immagini da georadar  
Immagini multispettrali

Magnetometria  
geoelettrica

Tipo 7

Tipo 8

<b>Rilievo di Beni Culturali su scala architettonica</b>	Termografia e fotogrammetria close-range
Rilievo di tipo tradizionale Laser scanning	

**Rilievo di distacchi e fessurazioni superficiali su dipinti e affreschi**

Fluorescenza microscopia elettronica con microsonda	Tipo 9
Termografia e indagini Imagin multirpettrale	

Tipo 10

<b>Studio "sostenibile" di edifici medievali (castelli, torri, chiese)</b>	Termografia ad infrarosso
Immagini stereo fotografiche da acquisizione aerea	

## **UTILIZZO DELLE RICERCHE ELENcate AI FINI DEL PRESENTE STUDIO**

Gli studi analizzati sono stati in parte utilizzati per il presente studio.

Infatti l'obiettivo della trattazione è stato quello di riuscire ad ottenere la calibrazione di una termocamera mediante un metodo semplicemente riproducibile, cui deve seguire una elaborazione del dato rilevato.

I programmi in dotazione alle termocamere, mediante i quali si ottiene un'immagine termica sovrapposta a quella fotografica rilevata contemporaneamente durante il rilievo, hanno il limite di non avere, sulle superfici intonacate, la possibilità di punti omologhi visibili sia sull'immagine fotografica sia su quella termica.

La tecnica individuata, per la quale è prioritaria la calibrazione, in due files differenti, dell'immagine termica e di quella fotografica, consente di sovrapporre correttamente le due immagini.

Dopo aver sovrapposto le immagini è possibile definire geometricamente gli elementi presenti al di sotto dell'intonaco e riprodurli graficamente su un elaborato grafico.

La valutazione dello scostamento della misura così rilevata (rilievo indiretto) con la misura effettiva sull'oggetto, ottenuta mediante demolizione dell'intonaco e misurazione diretta di un numero significativo di elementi, restituisce la correttezza del dato rilevato.

Tetto scostamento dalla misura reale di indica anche l'accuratezza della misurazione ottenibile mediante questa tecnica, che, in caso di edifici di pregio o affreschi, permette di avere dati geometrici, tecnici, materici, strutturali aggiuntivi senza demolire gli intonaci o elementi tutelati e di pregio.

Per questo gli studi sopra citati, pur se utilizzati, sono stati "adattati" in modo da ottenere una tecnica facilmente riproducibile da personale tecnico, anche se non in ambiente di ricerca, ad un costo di produzione/uso/vendita contenuto e



commercializzabile, pur mantenendo entro i limiti indicati dallo studio medesimo la correttezza metodologica e tecnica per il raggiungimento del datum.

Innanzitutto si è provveduto a creare vari prototipi di pannelli di calibrazione, ognuno testato secondo gli obiettivi prefissati. A partire dai pannelli di cui agli studi pubblicati, si sono testati varie tipologie, con differenti combinazioni di materiali. Il pannello utilizzato in via definitiva è stato denominato “pannello di calibrazione termo-fotografico”.

Dopo aver provveduto alla calibrazione contemporanea di termocamera e camera fotografica amatoriale, ovvero alla calibrazione della termocamera e della fotocamera integrata, si è provveduto a testare sull'oggetto scelto come indicato nel capitolo “METODI E STRUMENTI”, i limiti di utilizzo degli strumenti in dotazione (distanze, orientamenti, inclinazione della presa), segnando, come nel piano di campagna dei rilievi topografici, le varie sessioni dei rilievi.

In seguito si è provveduto a creare e testare i prototipi dei marker da apporre alle pareti intonacate, testati con lo stesso criterio del pannello di calibrazione, verificandone analogamente i limiti di utilizzo (distanze, orientamenti, posizionabilità, inclinazione della presa).

In vari studi è stato poi elencato come provvedere alla campagna di rilievo di un bene culturale. Data la circoscrizione delle variabili sul tema prescelto (pareti realizzate in vari momenti della vita dell'edificio, con demolizioni e ricostruzioni successive, utilizzando varie tecniche, materiali e componenti leganti, ma comunque intonacate), si è ritenuto opportuno identificare sia gli elementi sotto l'intonaco, dal punto di vista tecnologico e geometrico, sia valutare quali e quanti elementi differenti da quelli tecnologici e di materiali, potessero essere rilevati da termocamera. Pertanto sono stati ripresi: fessurazioni, passanti e non, solai con elementi metallici e laterizi, ma comunque intonacati, pareti di differenti spessori e con intonaci da interno e da esterno. La casistica indagata è risultata quindi comunque ampia, e assolutamente adeguata all'obiettivo individuato per lo studio, che non intende comunque essere esaustivo, data la vastità e varietà degli elementi rilevabili.

Il dato rilevato, fotografico e termico, è stato poi elaborato in post-elaborazione, al fine di ottenere un dato geometrico piano e/o tridimensionale a seconda dell'oggetto. Le immagini sovrapposte hanno restituito dati che sono serviti, in parte, per confermare nel rilievo effettuato alcuni principi definiti dagli studi pubblicati, quali ad esempio la verifica della definizione di rilievo del dato termico in funzione dello spessore dell'intonaco. Si è poi verificata la possibilità di ricostruire su modello tridimensionale la superficie muraria a supporto dell'intonaco, aggiungendo e completando la varietà dei dati che possono essere indispensabili in un rilievo non distruttivo sui beni culturali, nel rispetto del bene stesso.

## LA TERMOCAMERA FLUKE TiR32

Modello TiR32	
Dimensioni 17 x 12.2 x 27.7cm	Altezza 27.7cm
	Larghezza 12.2cm
	Lunghezza 17cm
Peso	1,05 kg (2,3 libbre)
Campo visivo 23 x 17°	23° ORIZZONTALE - 17° VERTICALE
Dimensioni display	3.7poll
Frequenza di aggiornamento	9 HZ
Messa a fuoco minima 15	
OBIETTIVO TERMICO	15 CM
OBIETTIVO VISUALE	45 CM
Misura di temperatura minima	-20°C
Misura di temperatura massima	+150 °C
Precisione di misura della temperatura	+/- 2° oppure 2% (a 25 °C nominali, a seconda del valore maggiore)
Correzione dell'emissività sul display	possibile
Compensazione della temperatura riflessa (RTC)	possibile
Correzione della trasmissione sul display	possibile
Risoluzione display camera	640x480
	640 orizzontale
	480 verticale
Risoluzione rilevatore termico	320x240
(serie di piani focali, microbolometro non raffreddato)	320 orizzontale
	240 verticale
Sensibilità termica (NETD)	Temperatura target ≤ 0,04 °C a 30 °C (40 mK)

Schema 4: caratteristiche della termocamera Fluke TiR32

La termocamera Fluke TiR32 è ottimizzata per le ispezioni dei rivestimenti degli edifici e la diagnostica degli edifici. L'imager è dotato della tecnologia IR-Fusion®, esclusiva della Fluke, dove un'immagine visiva intera (640 x 480) può

essere visualizzata, mescolata e memorizzata con ogni immagine IR. L'imager è dotato di sensori con matrice sul piano focale 320 x 240 e produce immagini termiche e visive su un display 640 x 480. Le immagini termiche e visive possono essere presentate contemporaneamente come immagine termica intera o immagine Picture-In-Picture (PIP) in varie modalità di mescolanza.

Le immagini termiche e visive vengono visualizzate sul display a cristalli liquidi dell'imager e possono essere salvate su una scheda di memoria SD rimovibile. Per trasferire le immagini su un PC, rimuovere la scheda di memoria SD e collegarla a un PC tramite il lettore di schede USB multiformato fornito. Il software SmartView® in dotazione permette di analizzare le immagini salvate e generare rapporti.

L'imager TiR32 è dotato di funzioni per la registrazione vocale per l'annotazione delle immagini salvate, la correzione dell'emissività, la compensazione della temperatura di sfondo riflessa, la correzione della trasmissione e altre funzioni che verranno di seguito specificate e descritte.

I menu, in combinazione con i tre pulsanti funzione, consentono di visualizzare le immagini termiche, salvare e visualizzare le immagini memorizzate e impostare le funzioni:

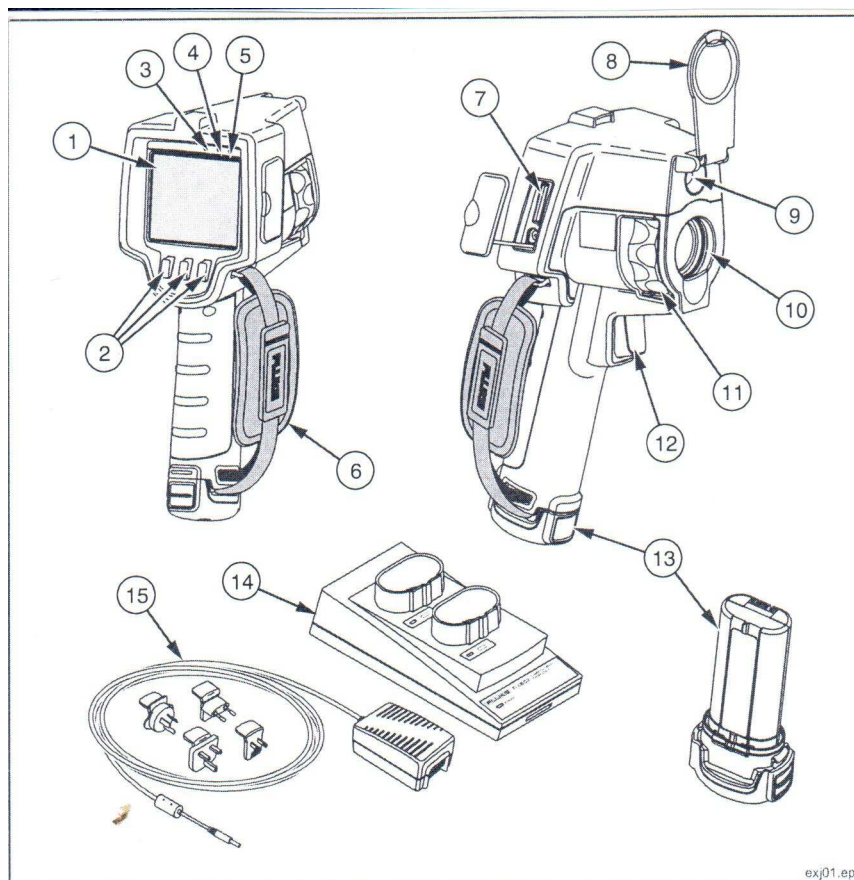
- Retroilluminazione
- Data e ora
- Emissività
- Formato del file
- Allarme di temperatura di rugiada
- Hot Spot e Cold Spot (punto a temperatura maggiore e punto a temperatura inferiore rilevati) e punto centrale sull'immagine
- Modalità IR-Fusion®
- Lingua selezionabile/selezionata
- Selezione dell'obiettivo
- Livello/Intervallo
- Tavolozza di colori Ferro, Blu-rosso, Alto contrasto, Ambra, Ambra invertita, Metallo rovente, Scala di grigi, Scala di grigi invertita

Colori in modalità Ultra Contrast: Ferro Ultra, Blu-rosso Ultra, Alto contrasto Ultra, Ambra Ultra, Ambra invertita Ultra, Metallo rovente Ultra, Scala di grigi Ultra, Scala di grigi invertita Ultra

- Compensazione della temperatura di sfondo riflessa
- Scala di temperature: l'imager può visualizzare la temperatura in gradi Fahrenheit o Celsius.
  - Correzione della trasmissione



Immagine 13: la termocamera Fluke TIR32



exj01.eps

Articolo	Descrizione
①	Display a cristalli liquidi
②	Pulsanti funzione (F1, F2 e F3)
③	Altoparlante
④	Microfono
⑤	Sensore di retroilluminazione automatico
⑥	Fascia da mano
⑦	Scheda di memoria SD/Vano della presa di alimentazione c.a.
⑧	Cappuccio lente retrattile
⑨	Fotocamera visiva (a luce visibile)
⑩	Obiettivo a infrarossi
⑪	Ghiera per la messa a fuoco
⑫	Pulsante di scatto per l'acquisizione di immagini
⑬	Pacco batteria intelligente agli ioni di litio rimovibile (2)
⑭	Base di carica doppia
⑮	Alimentatore/Adattatore c.a.

Immagine 14: la termocamera Fluke TiR32 elenco comandi

Sulla scheda di memoria SD dell'imager i dati possono essere memorizzati in tre formati di file diversi: .bmp, .jpeg e .is2. Questa impostazione viene salvata e rimane valida fino a quando l'imager non viene spento e riacceso. Il formato può essere sempre modificato prima di acquisire le immagini.

I formati bitmap e jpeg consentono di salvare solo l'immagine visualizzata sul display dell'imager. Il formato .is2 è un formato di file che permette di salvare tutti i dati radiometrici, l'immagine a infrarossi, le informazioni sulla modalità IR-Fusion®, le informazioni sulla tavolozza, l'immagine visiva intera, le impostazioni dello schermo e la registrazione vocale annotata per l'immagine memorizzata.

Le immagini bitmap (.bmp) o JPEG (.jpeg/.jpg) possono essere trasferite su un PC e utilizzate immediatamente in numerosi tipi di documenti software ed elettronici. Le immagini salvate nel formato .is2 possono essere trasferite a un PC per ulteriori analisi e la generazione di rapporti mediante il software Fluke SmartView® o software di altri fornitori specificamente approvato. SmartView® converte le immagini .is2 come file JPEG, BMP, GIF, TIFF e PNG.

Il thermal imager TiR32 consente di scegliere diverse opzioni per la visualizzazione delle informazioni sul display a cristalli liquidi. Tra le opzioni figurano: Visualizza tutto, Visualizza ora/data/scala, Visualizza scala e Visualizza solo immagine.

- **Visualizza tutto:** data, ora, barra della scala, indicatore della durata della batteria, impostazione dell'emissività, impostazione della temperatura di sfondo riflessa, impostazione della trasmissione e obiettivo facoltativo (se selezionato).
- **Visualizza ora/data/scala:** visualizza la data, l'ora, la barra della scala e l'indicatore della durata della batteria.
- **Visualizza scala:** visualizza la barra della scala e l'indicatore della durata della batteria.
- **Visualizza solo immagine:** visualizza solo l'immagine a luce visibile o termica o una combinazione di entrambe.

Se per la visualizzazione delle informazioni sull'imager è definita l'impostazione *Visualizza tutto*, viene visualizzato un simbolo "W" con la selezione dell'obiettivo grandangolare. Viene visualizzato un simbolo "T" nella parte inferiore del

display a cristalli liquidi con la selezione del teleobiettivo. La condizione predefinita è l'obiettivo standard senza alcun simbolo.

## LA FOTOCAMERA OLYMPUS SZ20 COMPATTA

Per la doppia acquisizione dell'immagine fotografica (da termocamera integrata e da macchina fotografica compatta), si è pensato di utilizzare una macchina compatta di uso amatoriale con caratteristiche decisamente superiori però rispetto alla fotografica integrata della termocamera.



Immagine 15: la fotocamera Olympus SZ-20

### **Sensore**

Pixel effettivi 14 Megapixel

Tipo di filtro colore Filtro colori primari (RGB)

Piena risoluzione 14.5 Megapixel

Tipo 1/2.3" Sensore CCD

### **Obiettivo**

Zoom ottico 20x (Grandangolare)

Lunghezza focale 4.5 - 90.0 mm

Lunghezza focale equivalente nel formato 35 mm

25 - 500 mm



Diaframma massimo 3.0 - 6.9

Struttura 11 lenti / 10 gruppi

Lenti asferiche 3

Elementi in vetro ED 3

Zoom digitale

Fattore di ingrandimento 4x / 80x in unione allo zoom ottico

### **Monitor**

Risoluzione 460000 punti

Dimensioni del monitor 7.6 cm / 3.0"

Tipo di monitor TFT

Aiuto all'inquadratura Sì

Regolazione luminosità +/- 2 livelli

Pannello di protezione Sì

### **Dimensione dell'immagine**

14M 4288 x 3216

8M 3264 x 2448

5M 2560 x 1920

3M 2048 x 1536

2M 1600 x 1200

1M 1280 x 960

VGA 640 x 480

16:9 4288 x 2416

1920 x 1080

## **IL METODO SCIENTIFICO APPLICATO AL PRESENTE STUDIO**

Ogni trattazione ingegneristica e/o scientifica deve avere una struttura che ne consenta la riproducibilità e la verifica da parte di altro operatore.

Per questo si ritiene utile riassumere brevemente il metodo che è stato utilizzato, indicandone le basi teoriche. Da queste basi viene indicato come si passa alla fase della procedura utilizzata, indicando la tecnica riproducibile che ha caratterizzato il lavoro di indagine e verifica svolto.

Il metodo scientifico si articola essenzialmente nei seguenti passaggi:

- osservazione
- riflessione
- ipotesi
- esperimento
- conclusioni

Ad ognuno di essi possiamo associare delle attività, che a loro volta devono poter essere riprodotte con la stessa o miglior efficacia ai fini dello studio.

Nella prima fase, quella dell'osservazione si è provveduto all'individuazione del fenomeno oggetto di studio e degli aspetti secondari, non rilevanti, che possono influenzare il fenomeno stesso. Rientra in questa fase la individuazione del tema scelto, che si è evoluto fin dall'inizio ed ha portato a circoscrivere l'integrazione delle tecniche alle due più comuni e semplici da utilizzare nel rilievo dei beni culturali: entrambe non distruttive, prive di contatto diretto con l'oggetto da rilevare, e per le quali occorreva identificare una tecnica che consentisse di ottenere un prodotto materialmente e geometricamente spendibile ai fini del rilievo del supporto sotto intonaco.

La seconda fase di riflessione, strettamente legata alla prima e fonte di continue interazioni con essa, ha portato alla verifica dello stato dell'arte delle tecniche

indagate, al riconoscimento e all'evidenza della loro integrabilità per l'obiettivo che è stato posto, e alla identificazione delle prime problematiche metodologiche e pratiche legate alla riproducibilità dei metodi già identificati da altri studi, che sono comunque stati ampiamente riportati nel capitolo relativo.

La terza fase ha consentito di identificare numerose “strade alternative” ipotizzabili ai fini della definizione della tecnica. In questa sede poi si sono ipotizzate alcune problematiche che si sarebbero potute poi riscontrare nella fase sperimentale diretta. Questa identificazione di problematiche, non sempre poi riscontrate nella fase sperimentale, ha riguardato ognuna delle ipotesi, in particolare proprie della fase sperimentale della calibrazione, per la quale sono già stati inquadrati numerosi metodi, ma che avevano, come ostacolo, la difficoltà di essere riprodotti su grande scala, con semplicità ma mantenendo gli standard di accuratezza del metodo e del risultato, per grandi numeri dal punto di vista della diffusione, e, non da ultimo, con costi contenuti.

Nella quarta fase si è proceduto a realizzare e verificare la tecnica, nelle sue differenti “versioni” alternative e nelle sue ipotesi realizzative di cui al punto precedente. Alcune fasi degli esperimenti hanno portato a esiti negativi, in quanto la tecnica così applicata, non rispettava tutti i requisiti finali che erano stati stabiliti. Alcune invece hanno poi consentito di adattare la metodologia e i materiali usati, portando alla identificazione della soluzione che meglio ottimizzava il raggiungimento degli obiettivi, che dovevano essere contemporaneamente verificati (riproducibilità su grande scala, facilità/semplificata di riproduzione della tecnica con mantenimento degli standard fissati per l'accuratezza del dato finale, possibile/potenziata diffusione per grandi numeri e quantità, costi unitari contenuti, sia per la produzione che per l'acquisto da parte dell'utilizzatore finale).

In questa fase sono stati anche identificati i limiti di utilizzo della tecnica, in base ai desiderata finali.

Nell'ultima fase si valutano criticamente, identificandoli nello specifico, i risultati applicativi ottenuti e ottenibili, la loro utilità ai fini del rilievo dei beni culturali e architettonici, la riproducibilità della tecnica da parte di tecnici del settore e con

strumentazioni “low cost”. Si propone l'utilità della tecnica ai fini della creazione di una nuova figura professionale, specificamente orientata all'identificazione degli strumenti ottimali per il raggiungimento dei fini proposti dall'utente finale (committente), a supporto delle professionalità già esistenti. Si identificano gli ulteriori sviluppi della tecnica, anche rispetto alle possibili integrazioni con altri metodi e strumenti topografici finalizzati al rilievo, quali laser scanner o altri.

Si valutano criticamente i limiti di applicazione rilevati, in particolare rispetto all'utilità e accettabilità del dato trovato, oltre ai possibili ulteriori sviluppi di ricerca e di studio che possono portare al loro miglioramento o addirittura al superamento degli stessi.

## DESCRIZIONE DELLA TECNICA DI RILIEVO

La presente tecnica di rilievo ha come obiettivo quello di poter interfacciare, in post elaborazione, in modo geometricamente corretto l'immagine termica e l'immagine fotografica. Le due immagini, rilevate o da unico strumento (termocamera con fotocamera integrata) o da due strumenti distinti (termocamera e macchina fotografica anche amatoriale), devono poter essere "relazionate" geometricamente per poter restituire il dato geometrico "nascosto" sotto l'intonaco e attribuire una "referenziazione" all'interno di un rilievo generale di tipo fotografico finalizzato alla restituzione tridimensionale dell'oggetto.

Le due immagini riprese non hanno punti omologhi. Al di là della differente ottica della termocamera rispetto alla fotocamera (integrata o no), che richiede una calibrazione separata per correggere la distorsione dell'ottica, risulta impossibile sovrapporre senza "errori" geometrici le due immagini. I programmi in dotazione alle termocamere integrate propongono dei software gratuiti che richiedono l'individuazione di punti omologhi per suddetta sovrapposizione. Detta indicazione è assolutamente manuale e la "precisione", anche in presenza di punti comuni significativamente evidenti e facili da individuare, ha un grado di correttezza geometrica che dipende dalla dimensione del pixel dell'immagini, e dalla capacità dell'operatore di identificare sulle due immagini affiancate i medesimi punti.

Per questo sono stati costruiti, come per il pannello di calibrazione, vari prototipi di "marcatori", che siano visibili da distanze individuate come "distanze limite", sia da termocamera sia da fotocamera.

Sono stati testati tre tipi di marker, tutti su supporto in mdf 3 mm, onde evitare di creare un “ostacolo” tridimensionale in fase di rilievo, soprattutto per immagini non frontali.



Immagine 16:

Marker tipo 1 da fotocamera integrata

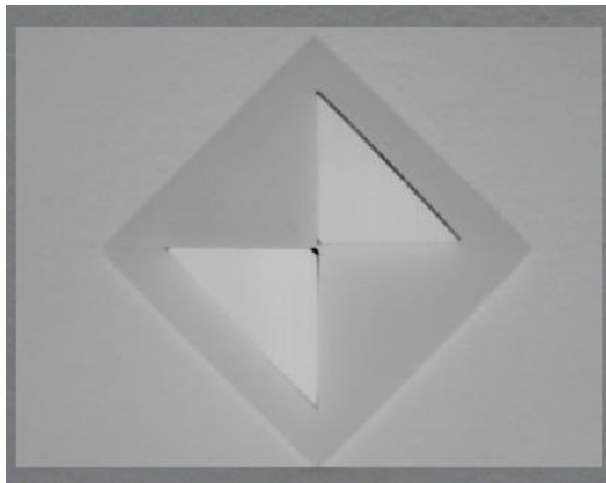


Immagine 17:

Marker tipo 1 da termocamera

Occorre realizzare un certo numero di rilievi e combinazioni, al fine di stilare una procedura riproducibile, e consentire una lettura chiara degli elementi al di sotto dell'intonaco al variare delle condizioni di situ e di rilievo sopra indicate.

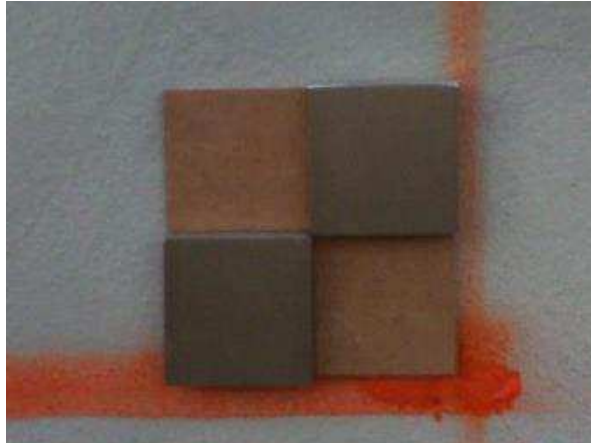


Immagine 18:  
Marker tipo 2 da fotocamera integrata

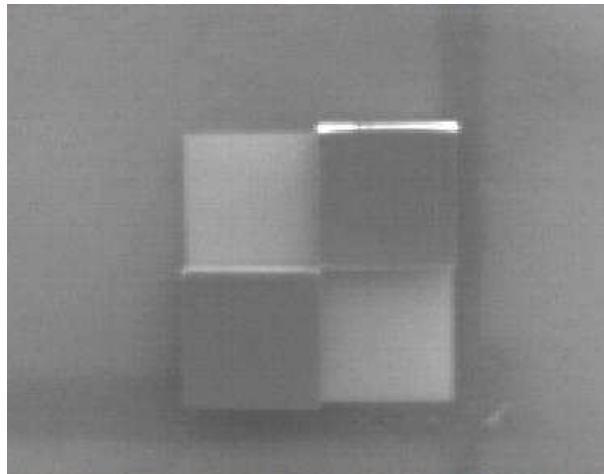


Immagine 19:  
Marker tipo 2 da termocamera

Dalle prove effettuate si rilevano alcuni problemi, che si possono tradurre in obiettivi intermedi da raggiungere:

- individuazione della necessità di “ideare” un marcatore caldo/freddo, che sia fotografabile sia dalla macchina fotografica sia dalla termocamera
- il marcatore deve essere posizionato sopra l'intonaco-la superficie-l'oggetto da rilevare, senza provocare “distruzione” del supporto medesimo, ma in perfetta aderenza con l'elemento
- sono stati costruiti artigianalmente alcuni “prototipi”. Il fine è quello di avere dei marcatori, da posizionare sull'oggetto intonacato, realizzati in modo tale da avere una griglia a croce (vedi foto e disegno allegato)

- va studiata la “resa” dei materiali usati nei marcatori, in funzione del numero maggiore di casi/combinazioni ipotizzabili
- i materiali neri (assorbimento di calore), e che vanno verificati con le prove della termocamera scelta, sono: vetro schermato riflettente, marmo o pietra, materiali a base di legno (si scaldano poco anche se non completamente neri);
- i materiali bianchi sono: foglio di feltro, vetro non riflettente, fogli di metallo o similari altri da sperimentare
- le combinazioni individuare ad oggi sono (mettere le combinazioni provate i base ai “prototipi fatti”)
- i marcatori possono essere anche realizzati con i materiali “sostituibili e intercambiabili”, previo semplice test termografico in situ, al fine di trovare la combinazione ottimale di materiali del marcatore, in base alle condizioni specifiche de rilievo;
- il marcatore può essere utilizzato con i 4 elementi dello stesso materiale, ovvero con materiali di due tipi differenti (legno/“pietra”, combinazione feltro/legno o altri), in modo che la loro posizione identifichi, sull'immagine della termocamera, una croce o una “X” che ha lo scopo di centrare il marcatore dell'immagine termografica, centrale lo stesso oggetto nell'immagine fotografica, e sovrapporre tramite almeno tre di questi riferimenti le immagini da trattare
- La sovrapposizione corretta delle immagini e la “lettura” degli elementi al di sotto dell'intonaco, individuati così anche nell'aspetto geometrico in modo corretto.

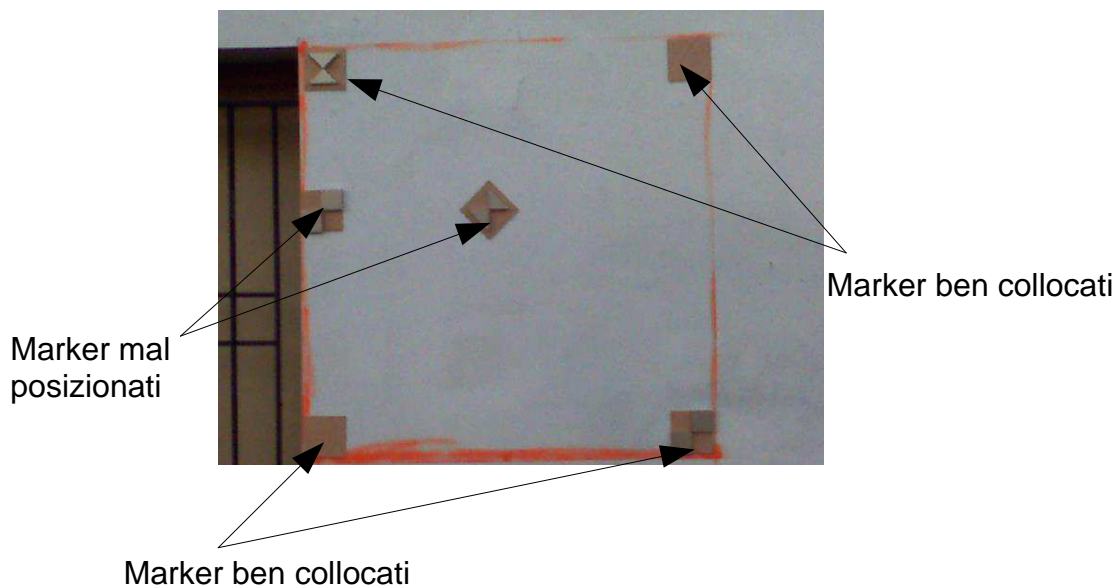
Il numero di rilievi effettuati, comunque limitato, ha consentito di comprendere collocazione ottimale per pareti interne e esterne da distanze tra 1 e 6 metri. L'immagine termica è contenuta in quella fotografica, in modo che si possa, con la coincidenza dei bordi di oggetti ripresi nelle due immagini, fare un pre-allineamento molto approssimativo delle due immagini per ottenerne la sovrapposizione.



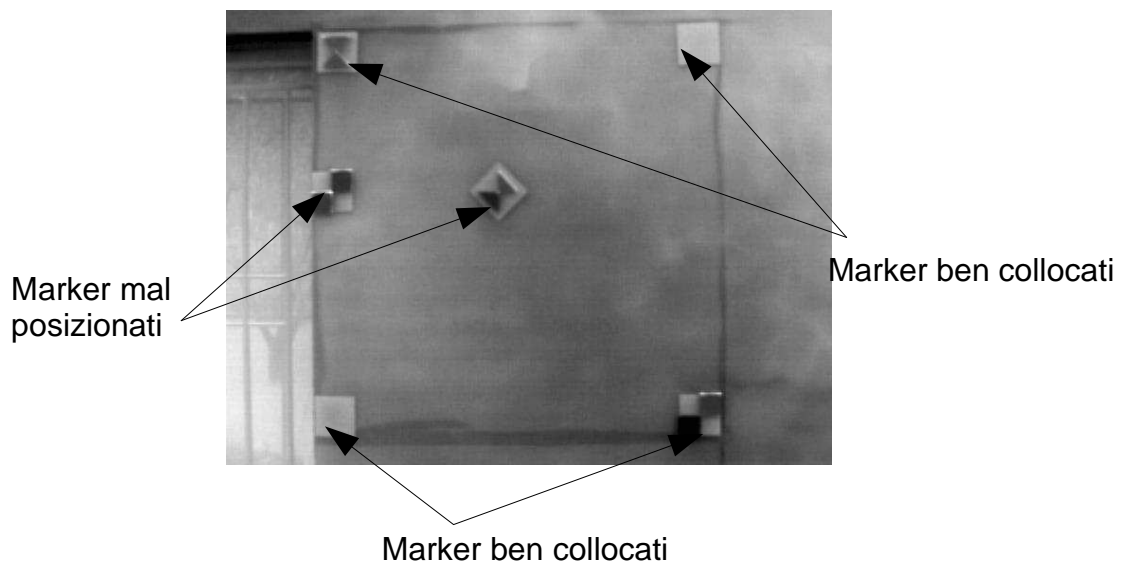
I 4 punti-maricatori devono essere disposti ad una certa distanza uno dall'altro, ma comunque in modo tale da essere compresi e vicini ai bordi della ripresa.

C'è da sottolineare che l'immagine termica rilevata da termocamera e l'omologa immagine fotografica da fotocamera integrata hanno, oltre a numero di pixel differenti, anche dimensioni complessive differenti.

Pertanto è necessario che siano in prossimità dei bordi dell'immagine termica, per ottimizzare le operazioni di calibrazione e correzione della distorsione.



Immagini 20-21: disposizione dei marker rispetto all'area da rilevare



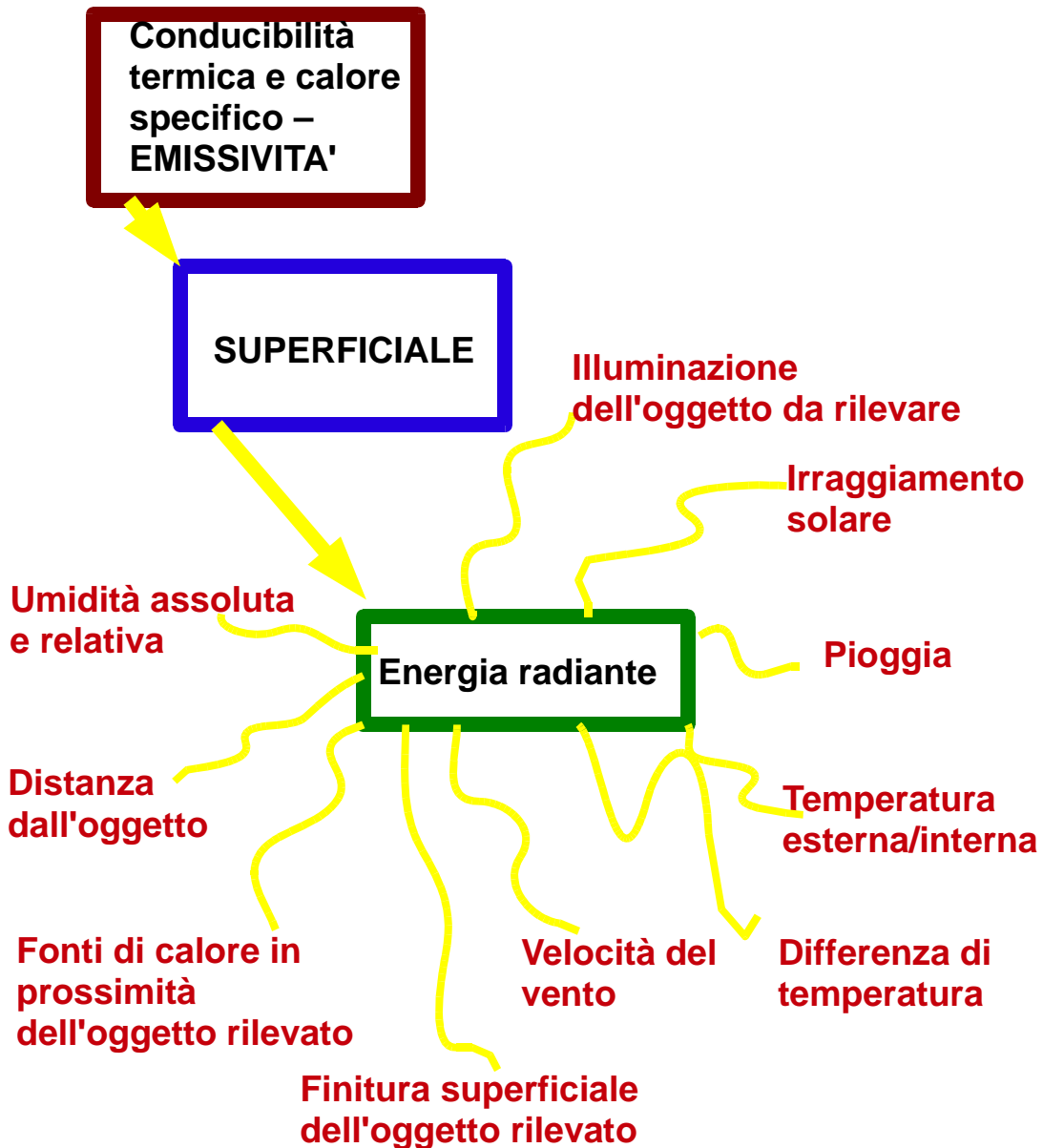
## **INDIVIDUAZIONE DEI FATTORI CHE INFLUISCONO SUL RILIEVO**

Elenco e breve descrizione dei parametri che condizionano la ripresa, fotografica e termografica, specificando che se ne possono aggiungere altri a seconda della ampiezza che si vuole dare all'analisi/ricerca :

1. Caratteristiche tecniche della termocamera e della fotocamera (sia integrate sia distinte): numero di pixel, qualità dell'immagine, distanza e angolazione di presa, lunghezza della focale etc.. Le camere possono avere definizione differente di parametri fondamentali (quelli che vengono inseriti nei programmi per la calibrazione e per la modellazione tridimensionali delle immagini del rilievo). I dati devono essere confrontabili e significativi dal punto di vista geometrico: infatti una definizione di fotocamera molto elevata (oltre i 70 pixel) è difficilmente raffrontabile con il corrispondente dato da termocamera, che ha, di solito, definizione media da 320x240 pixel. Gli elementi visibili nell'immagine fotografica non vengono identificati in quella termica. Altro invece accade quando la fotocamera è integrata alla termocamera. In questo caso le dimensioni dell'immagine sono già confrontabili per scelta del produttore.
2. Temperatura esterna (per edifici e superfici da rilevare in esterno).
3. Temperatura interna (idem in interno).
4. Differenza di temperatura tra i due "ambienti" adiacenti all'elemento da rilevare. In caso di equilibrio termico, ovvero di assenza di passaggio di flusso termico attraverso l'oggetto, è impossibile misurare il dato termico e viene a mancare l'oggetto da rilevare.
5. Umidità assoluta e relativa del mezzo (aria, atmosfera). Costituisce un ostacolo al passaggio del dato termico-emissivo al sensore rilevatore.
6. Presenza di umidità della/sulla superficie da rilevare. Stessi problemi di cui al punto precedente.

7. Umidità all'interno della superficie/parete da rilevare. Costituisce, al pari dell'umidità del mezzo, un ostacolo al passaggio del dato termico-emissivo al sensore rilevatore.
8. Soleggiamento della superficie da rilevare, durata del medesimo. Se la superficie da rilevare è stata esposta ad elevate temperature, ad esempio nelle stagioni calde, e/o per prolungato tempo, risulta impossibile rilevare le differenti temperature superficiali.
9. Illuminazione della superficie da rilevare (in particolare per la ripresa fotografica). Questa caratteristica è fondamentale per la ripresa fotografica, molto più che per quella termica.
10. Temperatura superficie da rilevare e omogeneità della temperatura stessa. Si ricollega al soleggiamento e al concetto di equilibrio termico delle zone adiacenti la superficie da rilevare. Difficilmente risultano rilevabili le superfici che, per qualche evento specifico, sono state mantenute a temperatura elevata, costante e omogenea. Le temperature poi devono rientrare nell'intervallo-campo di rilevazione della termocamera utilizzata. Indicativamente e mediamente, tra 0°C-100°C, le superfici sono indagabili.
11. Distanza della superficie da rilevare dal/dai punti di presa fotografica e termica. A seconda dell'immagine che stiamo analizzando, occorre assegnare dei limiti di vicinanza e lontananza, al fine di definire correttamente gli elementi rilevati. Per distanze troppo elevate, la lettura del dato da immagine termica diventa difficilmente rilevabile ovvero poco significativa dal punto di vista metrico-geometrico. Questo limite è dato dall'osservazione della dimensione dell'immagine e dai pixel che la caratterizzano.
12. Accessibilità della superficie da rilevare. La superficie deve essere ben visibile e, preferibilmente, rilevabile da più di una angolazione, senza ostacoli interposti, lontana da fonti direzionate e dirette di calore.
13. Presenza di vento: limiti e possibilità. Il vento, così come le caratteristiche del mezzo (aria e umidità), inibisce alcune funzioni della termocamera e, trasportando via dalla superficie e dal mezzo il calore, altera la rilevazione del dato termico. Nessun ostacolo invece provoca per l'immagine fotografica.

14. Altri parametri specifici del situ. La collocazione e le condizioni del situ devono essere attentamente osservate al fine di ridurre al minimo le possibilità di effettuare un rilievo alterato.



Schema 5: fattori che influenzano la rilevazione della emissività di un oggetto tramite termocamera.

## ACQUISIZIONE DELL'IMMAGINE DA TERMOCAMERA

Per provvedere all'acquisizione dell'immagine occorre puntare l'imager sull'oggetto o sull'area da riprendere, mettere l'immagine a fuoco girando l'apposita ghiera fino a quando l'immagine a infrarossi visualizzata sul display a cristalli liquidi non è nitida, quindi premere e rilasciare il pulsante di scatto. L'imager visualizza l'immagine acquisita e un menu. Il menu dei thermal imager TiR32 consente la memorizzazione di immagini, la regolazione delle impostazioni delle immagini e la registrazione di annotazioni audio per il formato di file .is2. Come specificato nella scheda tecnica, la distanza focale minima per la termocamera a infrarossi (con l'obiettivo standard) è 15 cm (circa 6 pollici). La distanza focale minima per la fotocamera a luce visibile (visiva) è 46 cm (circa 18 pollici). Ai fini del presente studio non è mai risultato necessario ottenere immagini da distanze inferiori.

L'imager può salvare l'immagine come semplice immagine o come immagine radiometrica; quest'ultima permette ulteriori analisi delle temperature.

Quando IR-IR-Fusion® è attivato, la regolazione della messa a fuoco IR consente di allineare le immagini a infrarossi con quelle a luce visibile sul display a cristalli liquidi. Quando la termocamera è messa a fuoco, le due immagini devono essere quasi sovrapposte. Questa funzionalità offre un metodo semplice per ottenere una buona messa a fuoco sull'immagine a infrarossi. Data la parallasse e le specifiche per la minima distanza di messa a fuoco, la distanza minima per un'immagine IR-Fusion® è di circa 46 cm.

L'imager utilizza una gamma di colori o di grigi per visualizzare il gradiente di temperatura dell'area compresa nel suo campo visuale. Sono disponibili due opzioni di regolazione della modalità di visualizzazione dell'immagine: Tavolozza e Portata.

Il menu Tavolozza offre la scelta tra varie tavolozze di colori. Le opzioni disponibili sono: Scala di grigi, Blu-rosso, Alto contrasto, Ferro, Ambra e Metallo

rovente. Le tavolozze Ultra Contrast™ sono disponibili per ogni tavolozza standard elencata sopra.

Per l'acquisizione corretta delle immagini occorre definire alcuni parametri di riferimento, che possono essere impostati, in acquisizione manuale o automatica, all'accensione della termocamera.

Per quanto riguarda la temperatura il livello e l'intervallo delle temperature visualizzate possono essere impostati automaticamente o manualmente. Nella modalità di selezione automatica della portata, l'imager determina automaticamente il livello e l'intervallo in base all'energia a infrarossi rilevata in qualsiasi momento e varia al variare dell'inquadratura. Eseguendo la ricalibrazione automatica man mano che l'energia a infrarossi cambia nel campo visivo. La scala di misura della temperatura viene aggiornata di conseguenza e nell'angolo superiore destro del display a cristalli liquidi viene visualizzato Auto. Nella modalità di selezione manuale della portata, per il livello, l'intervallo e la scala di misura della temperatura sono definite impostazioni fisse a meno che l'utente non scelga di regolare manualmente il livello e l'intervallo o di eseguire un ridimensionamento automatico rapido. La scala di misura della temperatura indica Manuale nell'angolo superiore destro del display a cristalli liquidi.

A questo proposito è importante sottolineare che si può, dopo aver inquadrato l'oggetto con modalità automatica, rilevare le temperature presenti, per poi impostare su di esse il range di temperature a livello manuale. Si ottiene così un maggior grado e distinzione anche cromatica delle temperature rilevate e una migliore "finezza" del rilievo termico. Infatti nella selezione manuale della portata, l'impostazione del livello regola l'intervallo termico del punto centrale nell'intervallo di temperatura totale dell'imager.

Da funzionalità manuale è infatti possibile regolare sia il livello delle temperature visualizzate (la posizione sulla scala termica), sia l'ampiezza in °C (o F) delle temperature che si vogliono visualizzare nella presa fototermografica.

Si può poi per alcuni modelli come questo, che ha la modalità IR-Fusion®, esclusiva della Fluke, consente di utilizzare varie modalità che combinano un'immagine termica con un'immagine visiva (a luce visibile). Sono disponibili

tre livelli di mescolanza tra cui scegliere per impostare l'imager: . Oltre all'impostazione della mescolanza da visiva a termica, il menu IR-Fusion® consente di selezionare una visualizzazione delle immagini termiche intere o una schermata Picture-In-Picture (PIP).

Quindi una volta che si è provveduto ad effettuare le operazioni sopra descritte si può acquisire l'immagine, integrandola anche con commenti scritti o vocali registrabili.

Come già enunciato nel capitolo delle definizioni tecniche, tutti gli oggetti sulla terra irradiano energia a infrarossi. La quantità di energia irradiata dipende principalmente da due fattori: la temperatura superficiale e l'emissività dell'oggetto. L'imager rileva l'energia a infrarossi irradiata da un oggetto e utilizza questa informazione per stimarne la temperatura. La maggior parte degli oggetti di cui occorre misurare la temperatura, come metallo verniciato, legno, acqua, la pelle e gli indumenti, irradia l'energia con elevata efficienza ed è quindi facile misurarne la temperatura con precisione. Per le superfici che irradiano energia con elevata efficienza, si stima che il fattore di emissività sia pari a circa il 95% (ovvero 0,95).

Questa stima è valida nella maggior parte dei casi, ma non per le superfici lucide o i metalli non verniciati. Questi materiali non irradiano energia in modo efficiente e hanno un'emissività bassa. Per ottenere accuratamente una misura della temperatura per i materiali con una bassa emissività, è spesso necessario correggere l'emissività. Il metodo di correzione più facile consiste nell'impostare l'imager sul valore di emissività appropriato in modo che la temperatura corretta della superficie venga calcolata automaticamente. Se l'imager utilizza un valore di emissività fisso (ovvero un valore che l'utente non può regolare), la misura dell'imager deve essere moltiplicata per un valore riportato nella tabella di consultazione per ottenere una stima più precisa della temperatura effettiva. Indipendentemente dalla capacità di un imager di regolare l'emissività durante la misura della temperatura, per le superfici con un'emissività di 0,60 o inferiore è spesso difficile ottenere misure accurate senza grandi errori. Si consiglia, quando è possibile, di modificare o migliorare l'emissività di una superficie se sono necessarie misure precise. L'imager TiR32, come anche la quasi totalità degli imager in commercio, è in grado di impostare l'emissività immettendo

direttamente un valore o utilizzando una tabella di valori integrati. Sono disponibili molte informazioni sull'emissività. Si consiglia di approfondire ulteriormente questo argomento per ottenere le misure della temperatura più accurate con l'imager.

La compensazione della temperatura di sfondo riflessa sull'imager è impostata nella scheda "Sfondo". Se l'emissività della superficie è bassa, gli oggetti molto caldi o molto freddi possono rendere meno accurata la misurazione della temperatura dell'obiettivo o dell'oggetto interessato. La regolazione dell'impostazione della temperatura di sfondo riflessa può aumentare l'accuratezza della misurazione della temperatura. Quando si eseguono ispezioni a infrarossi tramite finestre trasparenti a infrarossi (occhiali/finestre IR), non tutta l'energia a infrarossi emessa dagli oggetti da riprendere viene trasmessa efficientemente tramite il materiale ottico nella finestra. Se si conosce il tasso di trasmissione della finestra, è possibile regolare l'impostazione della correzione della trasmissione sull'imager, anche se questa operazione può essere fatta anche in fase di post-elaborazione. La regolazione dell'impostazione della correzione della trasmissione può migliorare l'accuratezza della misura della temperatura.

Dopo aver acquisito correttamente l'immagine, occorre passare alla fase di post-elaborazione. Ci sono in genere programmi che vengono forniti con la termocamera e che consentono di gestire l'immagine termica e analizzarla approfonditamente. Alcune variabili poi possono essere modificate anche dopo l'acquisizione, come l'emissività di un oggetto preso a riferimento. Per la termocamera Fluke TiR32 il software di riferimento è SmartView® e viene fornito con gli imager Fluke.

Contiene le funzioni per analizzare le immagini, organizzare la memorizzazione dei dati e creare report professionali. Consente la revisione delle annotazioni audio su un PC, permette di esportare le immagini a infrarossi e visibili come file JPEG, BMP, GIF, TIFF e PNG. La funzione più importante però appare, al fine di questo studio, la possibilità di individuare punti omologhi sulle due immagini (fotografica e termografica) per poter poi sovrapporle, integrando in tal



modo i dati termici geometrici aggiuntivi a quelli geometrico architettonici già visibili da fotografica.

Come già indicato, questa operazione di sovrapposizione avviene mediante l'individuazione in entrambe le immagini su SmartView®, di 4 o più punti corrispondenti. In questo caso è stata studiata la tecnologia per rendere questa operazione corretta dal punto di vista metodologico e geometrico, al fine di ridurre al minimo l'errore dell'operatore. La corretta sovrapposizione infatti trasforma anche il dato termico in dato geometrico aggiuntivo utile al fine della conoscenza dell'oggetto indagato.

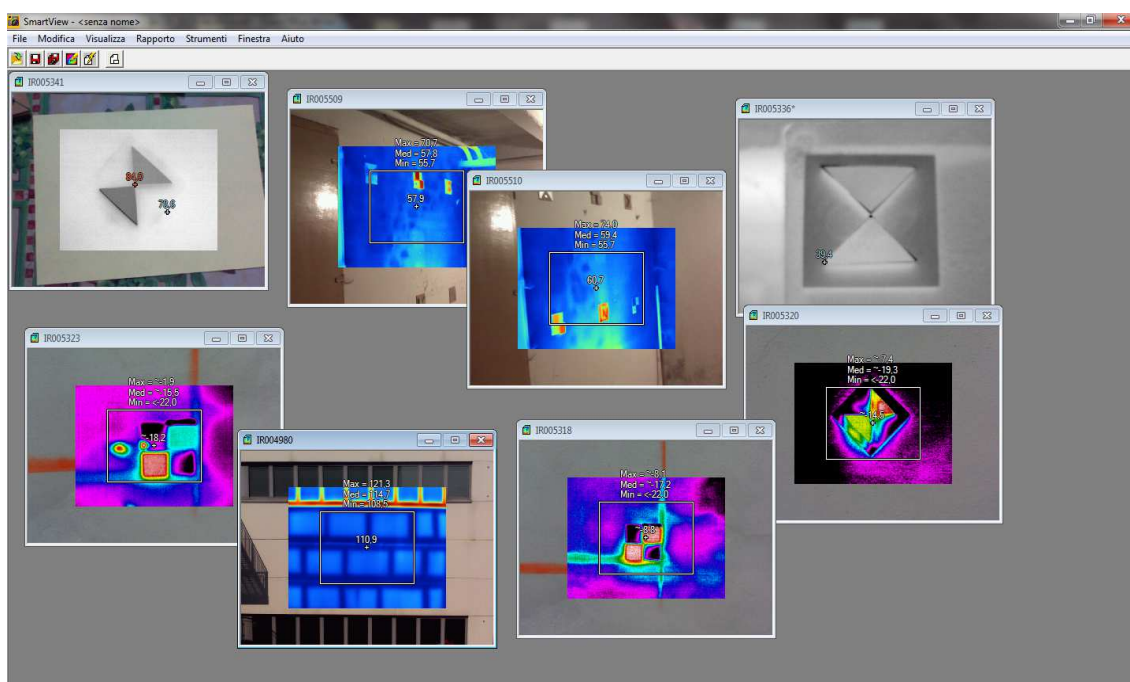


Immagine 22: Screenshot di SmartView® con immagini in elaborazione

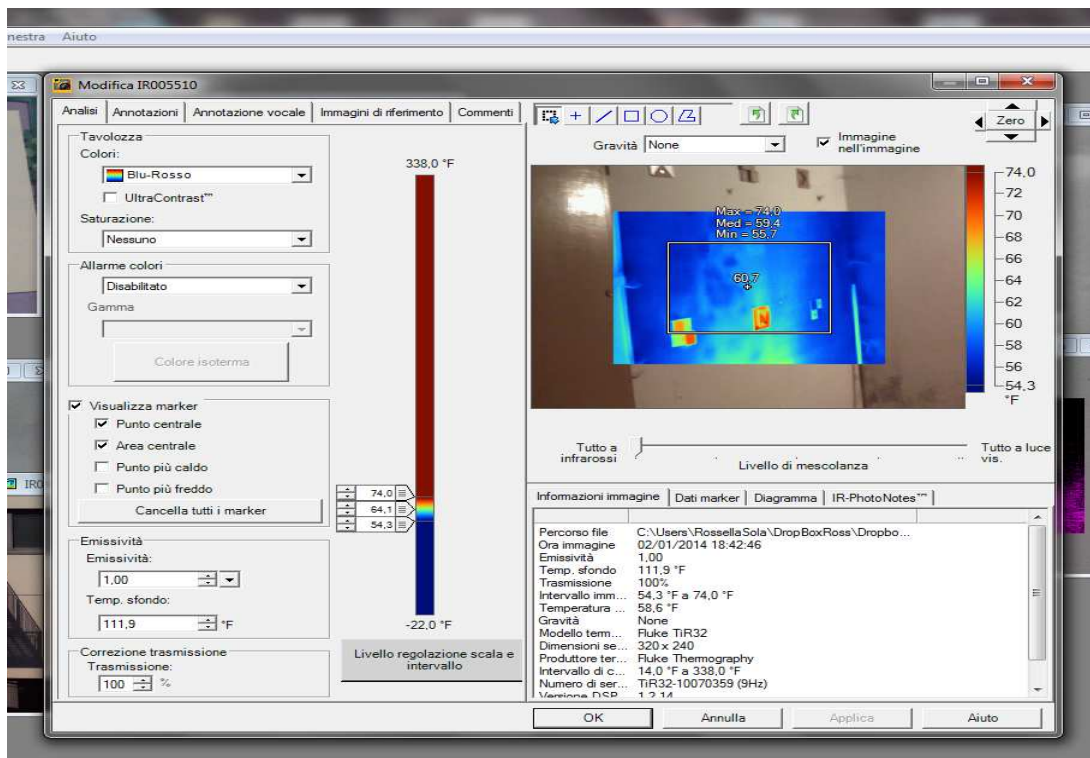


Immagine 23: Screenshot di SmartView®: elaborazione di immagine

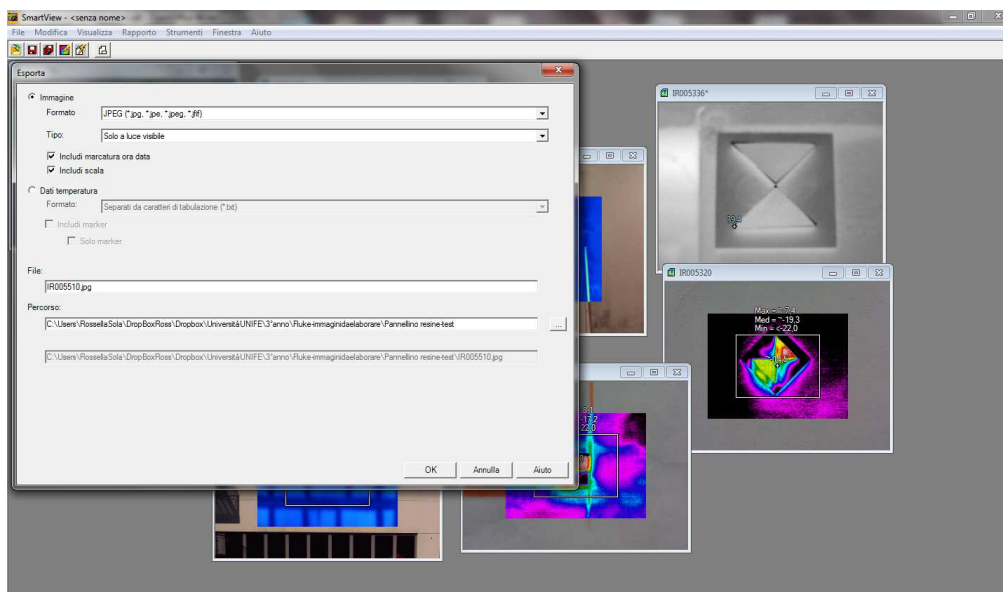


Immagine 23: Screenshot di SmartView® con esportazione di immagine: fotografica, termica o ibrida.

## ACQUISIZIONE DELL'IMMAGINE DA FOTOCAMERA

Il problema principale dell'acquisizione delle immagini da fotocamera, anche e soprattutto di tipo amatoriale, è la correzione della distorsione caratteristica della camera.

Ogni camera è dotata di parametri indicati dal produttore, che, attualmente, possono essere inseriti in programmi di elaborazione dell'immagine, opportunamente strutturati al fine di ottenere i dati di calibrazione da applicare alle immagini da essa catturate.

In questo studio si è comunque cercato di seguire le procedure tradizionalmente consolidate, per poter estendere l'utilizzo della tecnica anche a chi non è dotato di questi software di ultima generazione, o a chi non fosse interessato all'acquisto di strumenti integrati dal costo decisamente elevato (oltre 12,000€), che potessero eseguire la suddetta operazione automaticamente.

Si è pertanto costruito, dopo la prova di vari prototipi, un pannello di calibrazione con specifici marker riconosciuti da programmi come Photomodeler, che potesse essere utile sia per l'immagine da camera termica, sia per quella da camera fotografica. Si elencano di seguito le descrizioni e le caratteristiche materiali e costruttive dei vari pannelli-prototipi, corredati di immagini fotografiche e termiche a raffronto, al fine di mostrare quale percorso sperimentale sia stato fatto fino al pannello identificato come ottimale.

I criteri di valutazione-test dei vari pannelli sono stati:

- pannello leggibile senza sfocatura di immagine da distanze tra 50 cm e 3 metri, in ambiente aperto o chiuso
- pannello in cui si distinguessero chiaramente, sia da fotocamera sia da termocamera, sia nelle due immagini generate da termocamera con fotocamera integrata, i marker e i materiali, con confine netto e geometricamente definito in entrambe le immagini

- eventuale possibilità di accentuare, in caso di necessità, in modo rapido e con mezzi semplici e facilmente reperibili, le differenze cromatiche (corrispondenti a diverse emissività dei materiali) restituite dalla termocamera;
- precisione di realizzazione;
- semplicità di realizzazione;
- contenimento dei costi per la realizzazione del pannello;
- facilità di trasporto e movimentazione (peso e dimensioni).

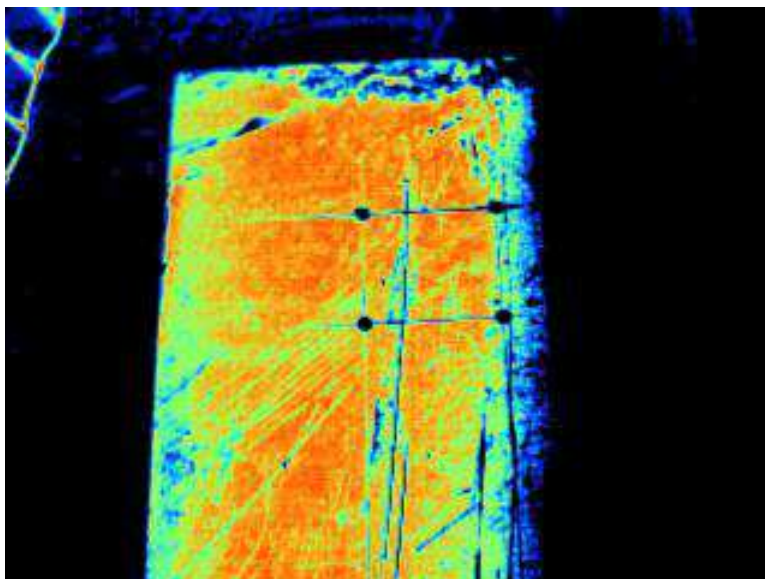
### **Pannello di calibrazione fotografico e termico**

Di seguito sono elencati i pannelli-prototipo realizzati e testati.

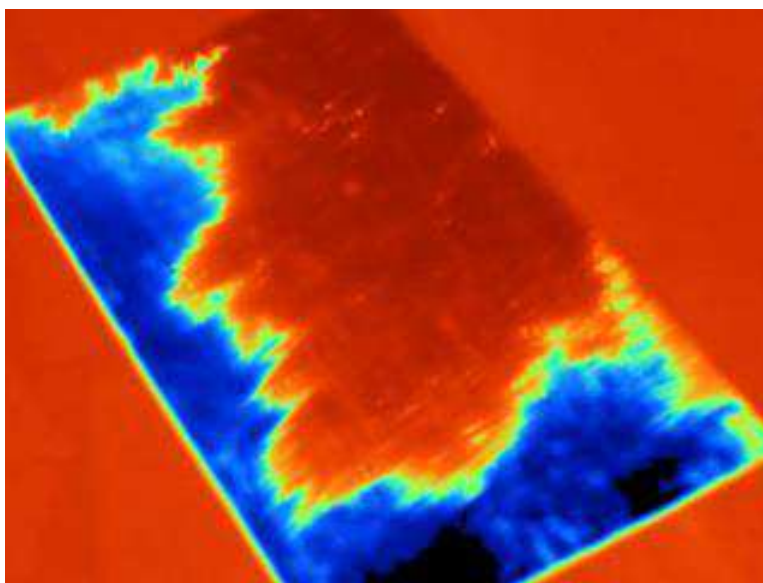
**Pannello n°1: pannello in acciaio inox, spessore 0,80 mm, con fori passanti**



*Immagine 25: Pannello in acciaio inox con fori passanti*



*Immagine 26: termica del pannello inox: problemi notevoli di riflesso, di visibilità dei più piccoli segni di costruzione del pannello.*



*Immagine 27: termica del pannello inox: problemi notevoli di riflesso. Si può notare l'immagine ribaltata di una albero, identificabile nei particolari.*

Il pannello di acciaio inox spessore 0,80 mm, di dimensioni atte a contenere tutti i seni grafici del foglio di calibrazione, è stato opportunamente forato con modalità di taglio laser a controllo numerico. Le prove di presa fotografica sono state realizzate in esterno, in giornata di medio soleggiamento, e il primo problema che è stato riscontrato è stata la forte presenza di immagini riflesse che venivano acquisite dalla termocamera sul pannello stesso. Altro aspetto

negativo è stato il rilevare che lo spessore del “foglio” di inox rendeva l'immagine relativa alla parte di foro poco netta, dato che il foro passante consentiva di vedere la parete interna del bordo del foro. Altro aspetto negativo, anche se solo in condizioni di particolare riscaldamento della superficie, sono le dilatazioni termiche dovute al tipo di materiale, che, anche se per poco, alterano la precisione delle misure in caso di prolungata esposizione al calore.

L'aspetto positivo dell'uso di questo tipo di pannello è stato la precisione con la quale è possibile realizzare gli intagli, la loro facile riproducibilità e il costo contenuto. In particolare sottolineo la facile trasportabilità del pannello, che, realizzato con questo spessore, non raggiunge un peso eccessivo.

**Pannello n°2: pannello in acciaio, ricoperto da strato di materiale grasso per evitare i riflessi**

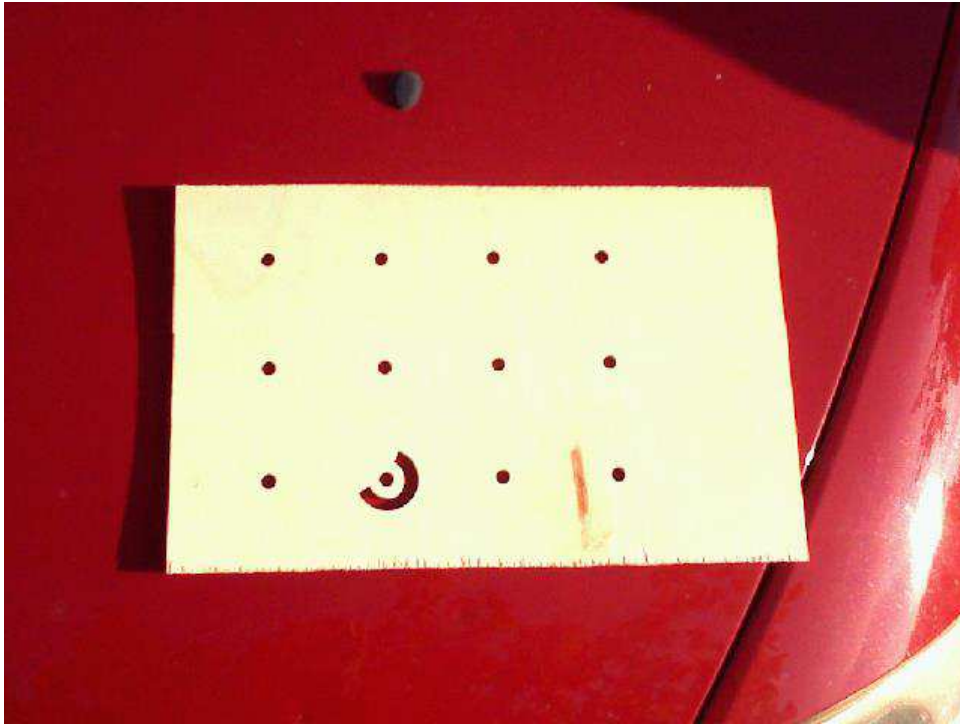
Al fine di ovviare al problema delle immagini riflesse sul pannello, che, pur non percepibili a livello, di immagine fotografica alterano i colori e le ombre nell'immagine termica, si è provveduto a coprire la superficie con un velo sottilissimo di grasso da intaglio. In questo caso la superficie ha mantenuto la sua caratteristica termicamente rilevabile, ma ha perso la capacità di riflettere le immagini circostanti. Questa scelta di ricoprire il pannello rende questo accorgimento poco pratico nella sua realizzabilità in caso di rilievo in situ. Pertanto si è provveduto a testare, come elencato di seguito, altri tipi di pannelli realizzati con altri materiali.

**Pannello n°3: pannello in legno normale con fori realizzati con sega da intaglio**

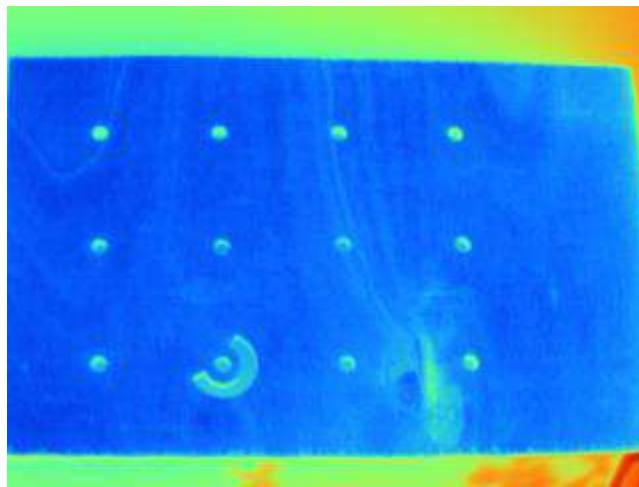
È stato realizzato un pannello di legno da falegnameria, spessore 14-16mm, con fori di precisione nelle posizioni richieste per la calibrazione.

L'immagine fotografica risulta abbastanza chiara e definita.





*Immagine 27: immagine fotografica del pannello di legno compensato: bordi non precisi.*



*Immagine 28: termica del pannello di legno compensato: buona immagine termica dei fori passanti, ma venature del legno troppo evidenti.*

Il pannello, se esposto alla luce normale del giorno per più di 5 minuti (la procedura di ripresa per le immagini di calibrazione è decisamente più lunga), si riscalda, evidenziando maggiormente la differenza di temperatura tra il pannello pieno e le parti forate. Il riscaldamento della superficie, che potrebbe comunque essere necessario in particolari condizioni ambientali, comporta però un

problema rilevabile dall'immagine termica: compaiono infatti le venature del legno e la foto termica del pannello non risulta più omogenea. Di contro poi il fatto che il legno sia di tipo massello, fa sì che i bordi dei fori tendano a non essere precisi come sarebbe necessario. Detti bordi poi sono estremamente sensibili a eventuali urti.

Lo spessore del pannello poi si evidenzia, come passaggio di aria a differente temperatura, attraverso i fori e viene rilevato dalla camera termica. Nulla in contrario se questo avviene in maniera uguale e omogenea per tutti i fori, ma dannoso se per qualche ragione/causa esterna questo non dovesse avvenire.

#### **Pannello n°4: pannello in mdf con fori riempiti di resine**

Il quarto pannello è stato realizzato in MDF, materiale composito costituito da polvere di legno agglomerata con resine compatibili.

Questo tipo di materiale è abbastanza omogeneo nella sua superficie e, anche se riscaldato, non dà problemi di omogeneità di emissività sulla superficie stessa.

Sono stati realizzati più fori di prova, non passanti, alla distanza di 10x10 cm l'uno, successivamente riempiti con resine compatibili con il materiale della base. I materiali di riempimento sono: cera da legno, resina tipo "sprint", resina epossidica, resina a base di gesso.

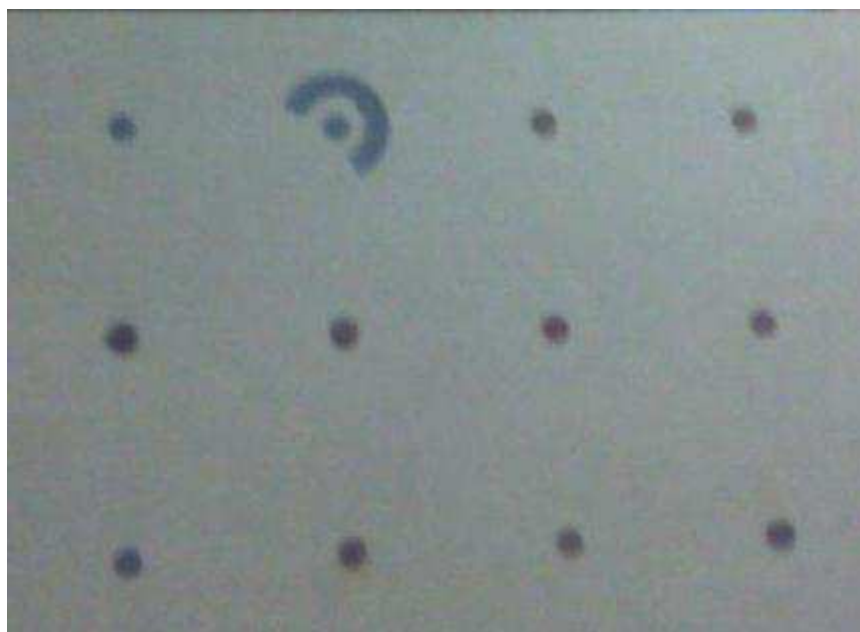
L'immagine fotografica non è significativa, dato che le resine usate sono di tonalità simile a quella del supporto in MDF. Essendo però facilmente colorabili, è possibile passare del colore scuro, anche nero, sulle superfici riempite dei fori, in modo che il pannello di calibrazione sia color legno chiaro nel pannello e nero nei fori.

L'immagine termica del pannello, acquisita con la termocamera in ambiente interno e a temperatura ambiente, mostra che non tutte le resine/cere applicate sono visibili.

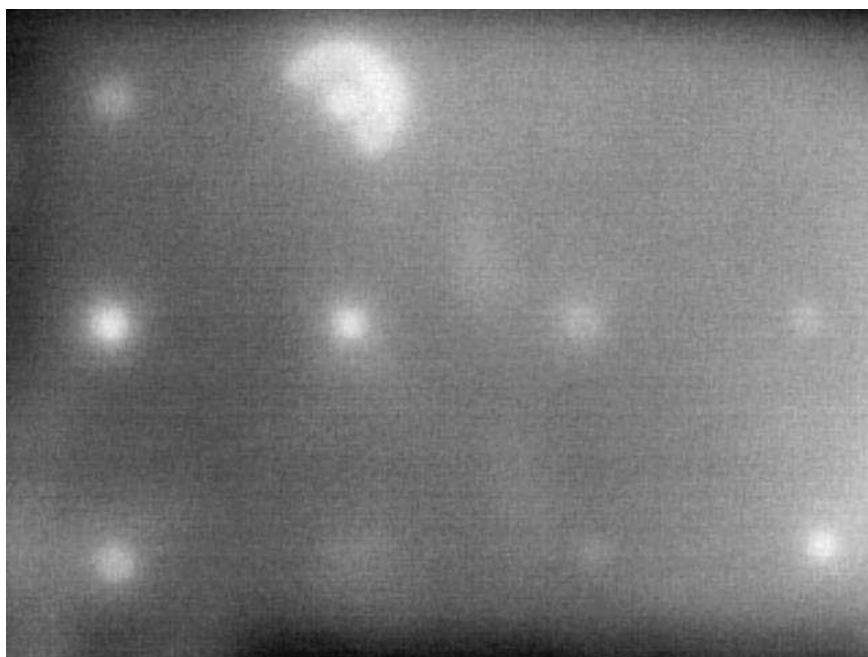
Per accentuare la differenza tra i materiali si è quindi pensato di riscaldare la superficie del pannello sottoponendola ad un flusso di calore omogeneo frontale. Dopo pochi minuti si è provveduto a ripetere la presa dell'immagine, sia termica sia fotografica. Con questo veloce riscaldamento (stesso risultato si è ottenuto esponendo il pannello a terra all'aperto ai raggi solari per non più di 5



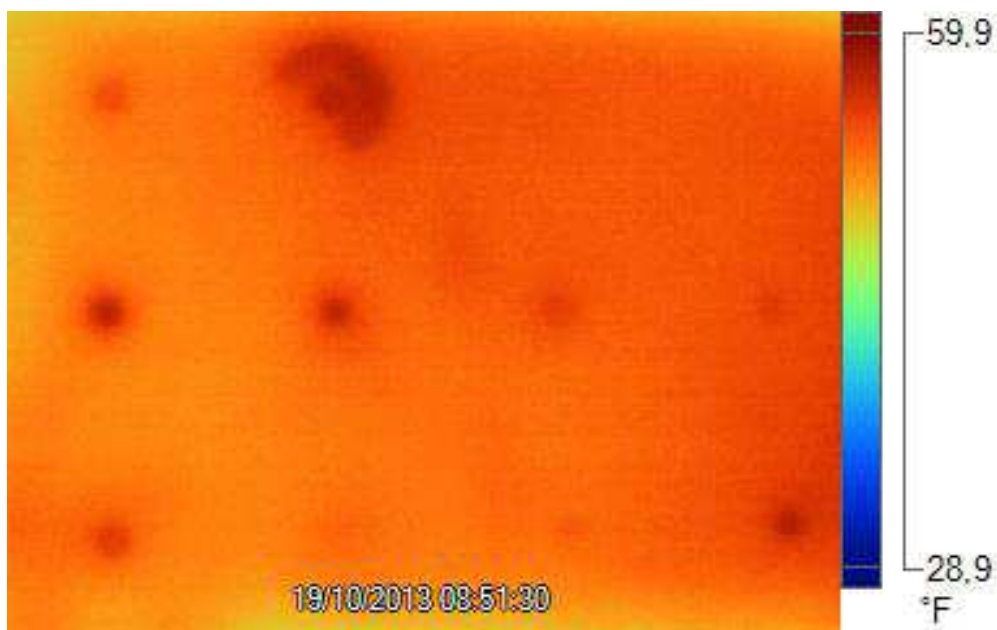
minuti), si è ottenuta un'immagine da termocamera estremamente chiara. I bordi delle resine erano tutti ben definiti. L'immagine da termocamera, convertita in colori b/n, traduceva perfettamente la differenza di emissività delle resine nei fori rispetto al pannello MDF, evidenziando anche alcune differenze tra le varie resine applicate.



*Immagine 29: pannello di legno MDF con resine. Immagine fotografica dei fori riempiti con varie resine*



*Immagine 30: pannello di legno MDF con resine. Immagine termica dei fori riempiti con varie resine, in versione di bianco e nero*



*Immagine 31: pannello di legno MDF con resine. Immagine termica dei fori riempiti con varie resine, in versione cromatica.*

Questo pannello è relativamente semplice da realizzare, e a costi contenuti. Le due resine migliori, che evidenziano un'emissività nettamente differente dal supporto in MDF, sono la cera d'api e la resina tipo "sprint". Quella con maggior differenza di emissività resta comunque la cera. La differenza di temperatura provocata con il riscaldamento della superficie incrementa ulteriormente la "leggibilità" del pannello di calibrazione, come si può evidenziare dall'immagine sopra riportata. Nessuna rilevanza utile invece hanno dato la cera a base di gesso e quella epossidica, che non sono quindi adatte all'uso indicato e necessario. Con questa condizione migliorativa, realizzabile, come già descritto, riscaldando il pannello al sole su superficie piana, ovvero mediante fonte di calore diffusa (ad esempio una termo-stufa elettrica portatile o, nel caso, un semplice phon da capelli), le immagini risultano chiare e i contorni ben definiti. In ogni caso, data la delicatezza della procedura di acquisizione dell'immagine termica, è stato opportuno invertire le modalità solite di presa. Infatti solitamente la acquisizione delle immagini per la calibrazione avviene posizionando il pannello su superficie piana e provvedendo ad acquisire le immagini con inclinazione a 45° circa rispetto al piano stesso, e ruotando con la fotografica

attorno al pannello in modo da avere un'immagine per ogni quadrante e un'ulteriore immagine per ogni diagonale del quadrante. In tal senso si descrive la procedura standard nel capitolo “\_\_\_\_\_” con espliciti riferimenti ad altri studi analoghi, tesi, testi pubblicati e ricerche riferite alle macchine fotografiche amatoriali e professionali.

Dato che, nell'uso della termocamera, non è possibile “mantenere fisso” lo zoom dell'ottica si è provveduto a installare nel retro del pannello delle barre sottili di acciaio, in posizione assiale (x-y) in modo che a ruotare sia il pannello, mantenendo la termocamera nella stessa posizione fissa per ogni presa di immagine. Questo accorgimento, apparentemente “inutilmente complesso” consente di non aver alcuna modifica del fuoco e della messa a fuoco dell'immagine termica, in modo da avere per ogni immagine della procedura di calibrazione, gli stessi dati di impostazione dell'ottica. Si aggiunga poi che la termocamera rileva le differenze di emissività e restituisce, come dato superficiale, anche la temperatura dell'oggetto. Si è verificato però, per il pannello di calibrazione, chela differenza di temperatura varia molto nel caso di inclinazioni non adeguate, e di eccessiva distanza dal pannello stesso. Pertanto seguirà, nella descrizione della calibrazione per singole fasi, una valutazione quantitativa del parametro “distanza” del punto di presa termo-fotografico, per ottenere una corretta e più chiara serie di immagini termiche e fotografiche e facilitare la fase di acquisizione e corretta elaborazione dei programmi di correzione delle distorsioni.

**Pannelli n°5-6: realizzato in MDF con applicazioni in carta di papiro e in carta stagnola**

Nonostante il precedente tipo di pannello sia, per produzione e costi, relativamente semplice da realizzare, si è provato anche a costruire un pannello molto più semplice e ancor meno costoso. In luogo dei fori e delle resine sono stati usati dei semplici dischi di carta, applicati su un pannello di spessore ancora ridotto rispetto al precedente, dato che non risultava necessario eseguire dei fori non passanti.

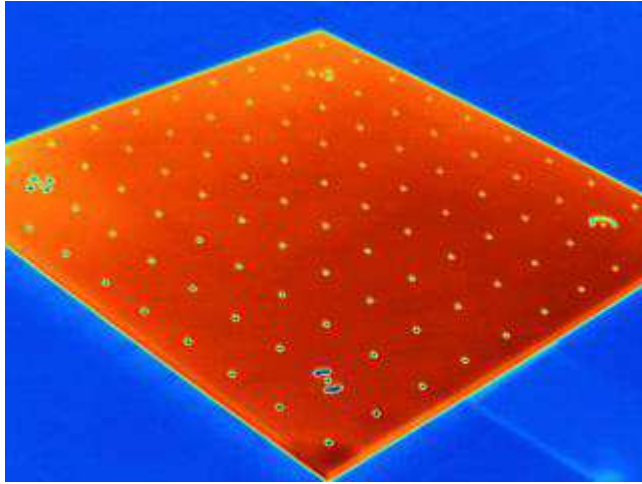
Questi pannelli risultano più leggeri da trasportare e da ruotare nella procedura precedentemente descritta per l'acquisizione delle immagini. Si aggiunga poi che il dato dell'emissività risulta ben leggibile anche senza provvedere al pre - riscaldamento della superficie del pannello.

Infatti sia la carta ( $\epsilon > 0,90$ ) sia la carta stagnola ( $\epsilon < 0,10$ ) hanno emissività sostanzialmente differenti a quella del pannello in MDF ( $\epsilon = 0,85$ ) e, così, facilmente distinguibili nella forma applicata sul pannello medesimo.



*Immagine 32: pannello di legno MDF con marcatori in stagnola. Immagine fotografica.*

Pertanto si ritiene che questo ultimo, in particolare quello con le sagome realizzate in carta stagnola e applicate con una semplice colla vinilica nella posizione corretta del pannello, sia la soluzione più semplice da realizzare e utilizzare ai fini dell'acquisizione delle immagini per calibrare sia la macchina fotografica amatoriale o semi professionale, sia la termocamera, ovvero la termocamera con fotocamera integrata.



*Immagine 33: pannello di legno MDF con marcatori in stagnola.: Immagine termica, con contrasto evidente tra i materiali.*

## **CALIBRAZIONE DELL'IMMAGINE ACQUISITA DA TERMOCAMERA**

Una volta costruito opportunamente il pannello di calibrazione, come indicato e descritto nel punto del capitolo precedente al “pannello n°6”, abbiamo dimostrato la possibilità di riuscire a calibrare la termocamera nei due seguenti casi:

- 1) Calibrazione di termocamera con fotocamera integrata: il pannello è costituito da due materiali a emissività molto differente, che vengono rilevati dall'ottica termica nelle più comuni condizioni ambientali.
  
- 2) Calibrazione di termocamera senza fotocamera integrata, da effettuarsi in unione con la calibrazione di una normale macchina fotografica amatoriale.

### **La calibrazione della termocamera integrata**

La calibrazione della termocamera nel primo caso avviene in due fasi. La termocamera infatti è dotata, come sopra descritto, di due assi ottici, uno per il rilievo del dato termico, uno per la presa della fotocamera.

La difficoltà della calibrazione sta proprio nel fatto che la coppia di immagini deve essere calibrata, in due procedimenti distinti, da programma di calibrazione (come Photomodeleo o Agisoft).

L'immagine termica, che per comodità è stata convertita nel b/n eliminando la gradazione dei colori, va calibrata utilizzando i dati della componente termica della termocamera; l'immagine fotografica, ripresa nello stesso momento, va invece calibrata utilizzando i dati dell'ottica fotografica.

Se le immagini derivano dalla sola termocamera con camera integrata, occorrerà quindi preventivamente “estrarre” due immagini: quella termica convertita in b/n e quella fotografica, per poi acquisirle, in due procedimenti

distinti, nel programma di correzione della distorsione. In questo senso il file che viene creato durante la presa deve essere elaborato con programma in dotazione alla termocamera (ogni produttore ha in proprio). Siccome la procedura per la calibrazione e correzione della distorsione dovuta all'ottica della camera di presa richiede l'uso di più immagini dello stesso pannello, acquisite da più angolazioni, questa fase è abbastanza complessa. È stata quindi individuata una procedura tecnicamente corretta per consentire di effettuare “passo passo” le prese, in modo da velocizzare la fase iniziale del rilievo.

Descrizione delle modalità di presa per la calibrazione: rotazione del pannello +-45° “sopra sotto” e “dx sx” con termocamera integrata in posizione fissa.

### **La calibrazione della termocamera e di una macchina fotografica amatoriale**

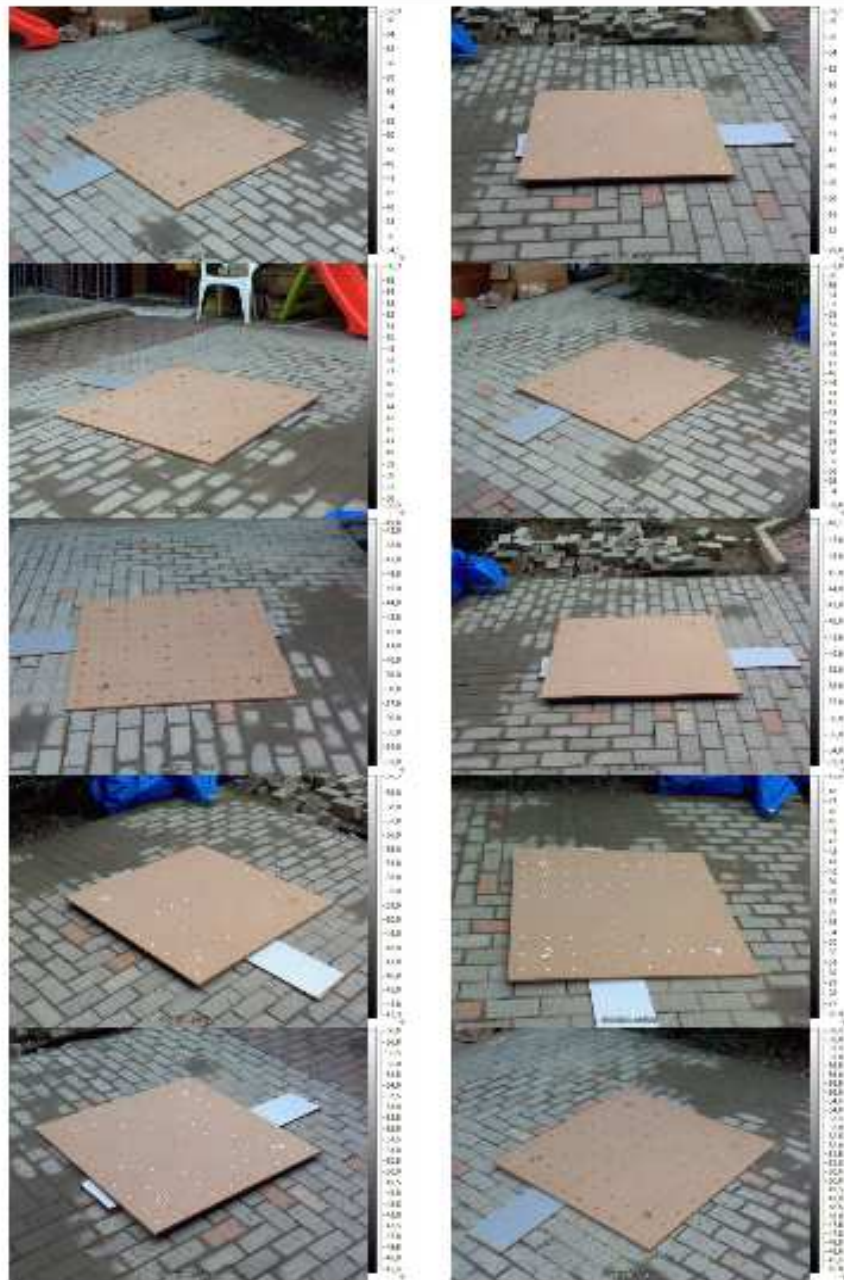
Se le due immagini derivano da una termocamera senza fotografica e da una fotografica amatoriale, i due procedimenti vengono eseguiti direttamente su programma di calibrazione inserendo le caratteristiche delle camere, come indicato nella scheda tecnica dei produttori.

Il procedimento di acquisizione delle immagini può avvenire con la stessa modalità sopra descritta, per quanto riguarda la termocamera. Per la macchina fotografica il procedimento è quello “classico”, solitamente utilizzato per tutte le camere, sia professionali, sia amatoriali. Si sottolinea comunque che le macchine amatoriali oggi in commercio, pur nei costi contenuti, hanno raggiunto livelli tecnologici e caratteristiche tecniche di ottimo livello.

Sono state effettuate varie prove di calibrazione dalle prime immagini e si è potuto verificare come il numero di prese fotografiche non cambi rispetto alla calibrazione di una normale macchina fotografica.



Di seguito si riportano alcune delle immagini utilizzate per la calibrazione.

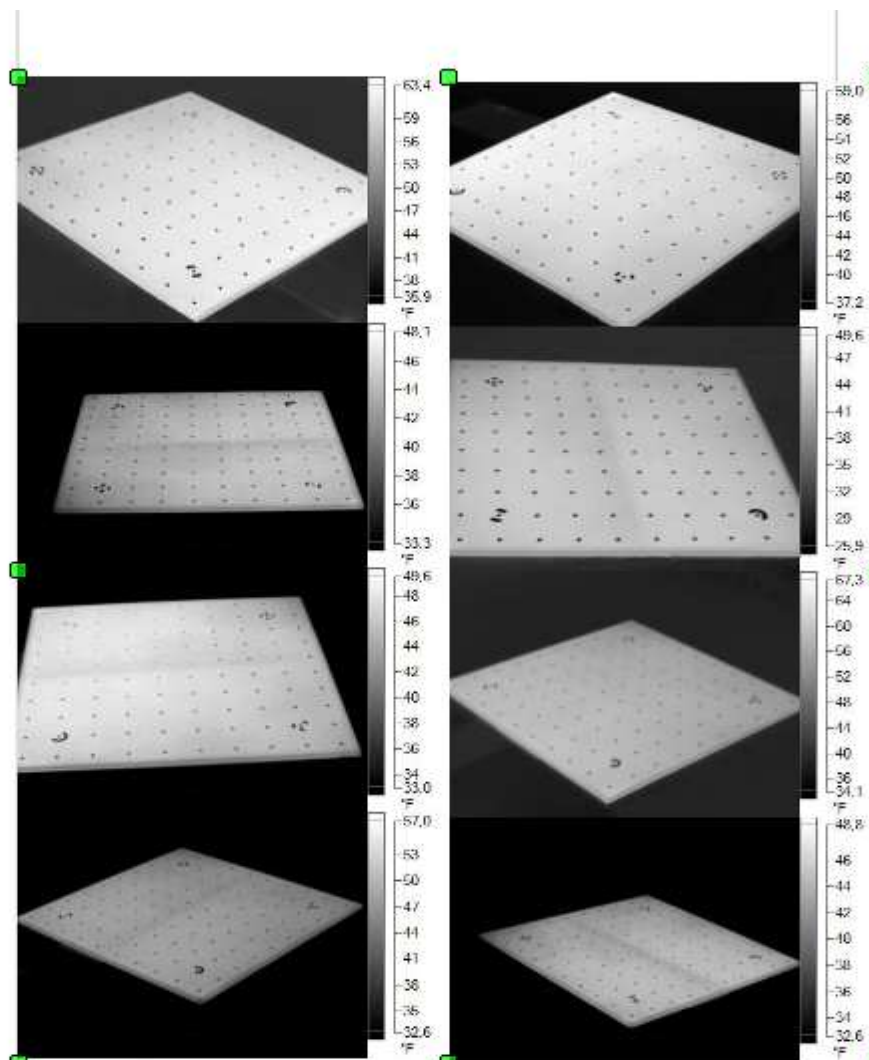


*Immagine 34: immagini fotografiche da termocamera del pannello di legno MDF con marcatori in carta stagnola.*

La difficoltà, in caso di presa fotografica da termocamera, è stata quella di riuscire a tenere la messa a fuoco fissa. A questa si è rimediato tracciando una linea equidistante attorno al pannello, e provvedendo con treppiede ad effettuare prese a inclinazione e distanza fissate rispetto al centro del pannello, ruotando attorno ad esso nelle posizioni diagonali e assiali fissate.



Altra difficoltà è stata la dimensione in pixel dell'immagine è inferiore alla definizione preimpostata standard del programma di elaborazione-calibrazione. In questo caso è stato necessario impostare i dati di lunghezza focale e dimensione immagine fotografica derivata dalla termocamera.



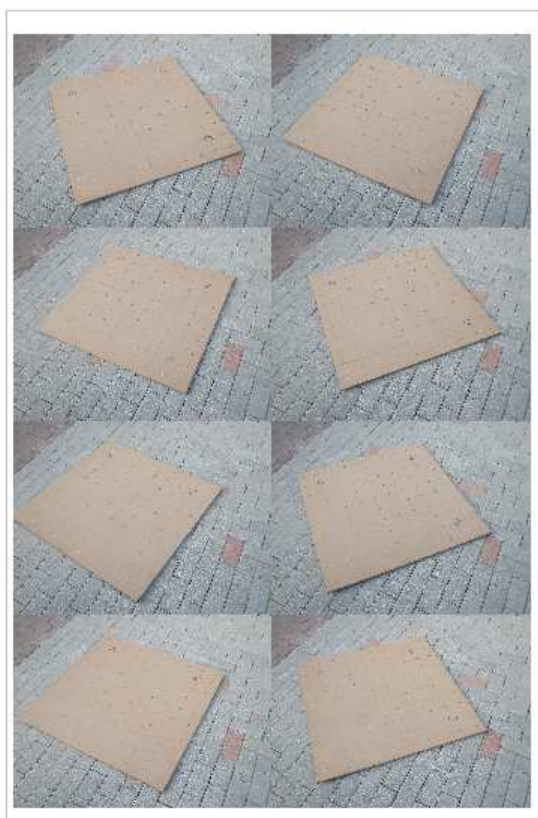
*Immagine 35: immagini termiche da termocamera del pannello di legno MDF con marcatori in carta stagnola.*

La prima difficoltà di questa calibrazione-elaborazione è stata la necessità di uniformare le immagini. Le varie prese, anche se realizzate per gruppi omogenei nelle stesse condizioni esterne di soleggiamento e ambientazione, avevano, nella versione multicromatica, molte differenze ed erano difficilmente utilizzabili, in quanto la varietà di temperature rappresentate ha reso difficile il riconoscimento dei target del pannello e della loro forma.

Dopo numerosi tentativi, si è provveduto a modificare la multicromaticità delle immagini in immagini in scala di grigi, accentuando, nella schermata di modifica riportata in immagine 23 di cui al capitolo precedente, il contrasto bianco/nero per meglio identificare i suddetti marker.

Al fine poi di ottimizzare la rapidità, ove possibile, delle operazioni di calibrazione, le prese sono state effettuate mantenendo, oltre allo zoom fisso, la stessa distanza dal pannello di calibrazione, pur provvedendo ad effettuare le prese da 8 angolazioni (quattro sulle diagonali del pannello e quattro sugli assi medi).

Di seguito si riporta invece un campionario di immagini utilizzate per la calibrazione della macchina fotografica tipo amatoriale Olympus SZ-20, le cui caratteristiche sono state inserite in dettaglio nel capitolo relativo alle strumentazioni utilizzate.



*Immagine 36: immagini fotografiche da Olympus SZ-20 del pannello di legno MDF con marcatori in carta stagnola, utilizzate per la calibrazione.*

Per quanto riguarda i programmi utilizzati per calibrare le camere, sono stati scelti i seguenti:

Photomodeler, che permette di ricreare un oggetto o un ambiente tridimensionale a partire direttamente da una serie di immagini fotografiche

Agisoft, che ha funzionalità molto simili ma con l'accorgimento di poter calibrare da immagini fotografiche o direttamente inserendo le caratteristiche della macchina fotografica, se esistente nel database, ovvero impostando le caratteristiche di quelle non presenti nel database.

## **I programmi di calibrazione-elaborazione**

### **PhotoModeler Scanner**

PhotoModeler consente di creare modelli 3D di alta qualità accurati e misurazione da fotografie utilizzando la macchina fotografica, anche di tipo amatoriale.

Sono in commercio tre versioni: versione base, versione Scanner, versione Motion. Quella in dotazione per il presente studio è la versione Scanner.

PhotoModeler è il prodotto di base, che permette la creazione di modelli, la misurazione dai modelli degli oggetti modellati, la stampa e l'utilizzo dei target codificati, l'automatizzazione dei progetti.

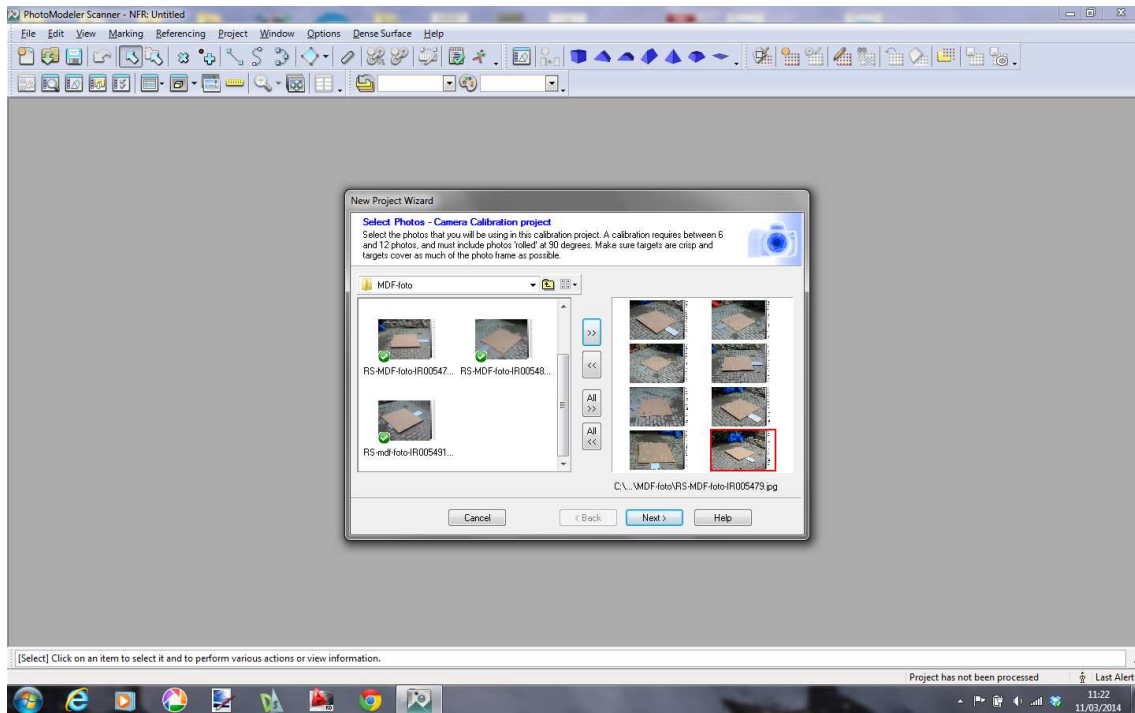
PhotoModeler Scanner contiene tutte le funzionalità di PhotoModeler, e aggiunge SmartMatch, scansione e modellazione di superfici dense (DSM) e la possibilità di inserire superfici e forme organiche all'interno del modello.

PhotoModeler Motion contiene tutte le funzionalità di PhotoModeler Scanner e aggiunge la misurazione nel tempo.

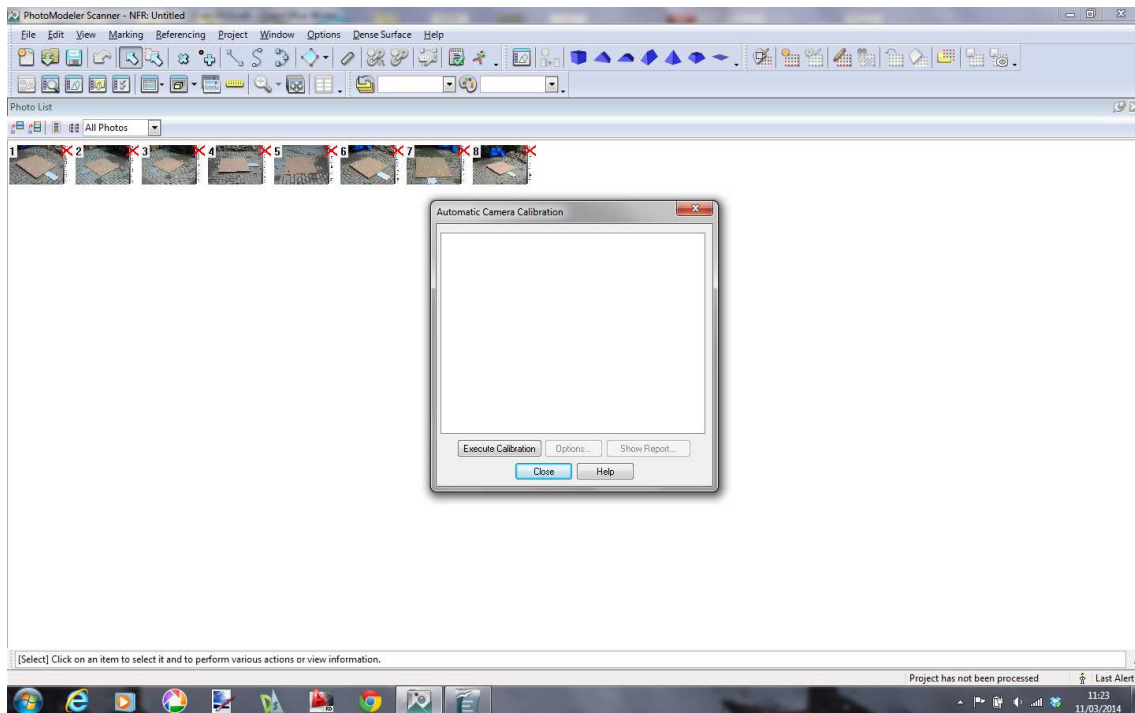
PhotoModeler, come il prodotto di base, è uno strumento potente e relativamente economico, che consente di costruire modelli accurati e ottenere misurazioni dalle foto.

Attraverso l'uso di PhotoModeler si possono creare:

- Modelli CAD-come di una grande varietà di oggetti e scene.
- Modelli utilizzando punti, linee, bordi, superfici (texture di foto o all'ombra) e altri enti.
- Progetti automatizzati, utilizzando le funzionalità di rilevamento bersaglio incluse



Immagini 37-38: screenshot del programma di calibrazione



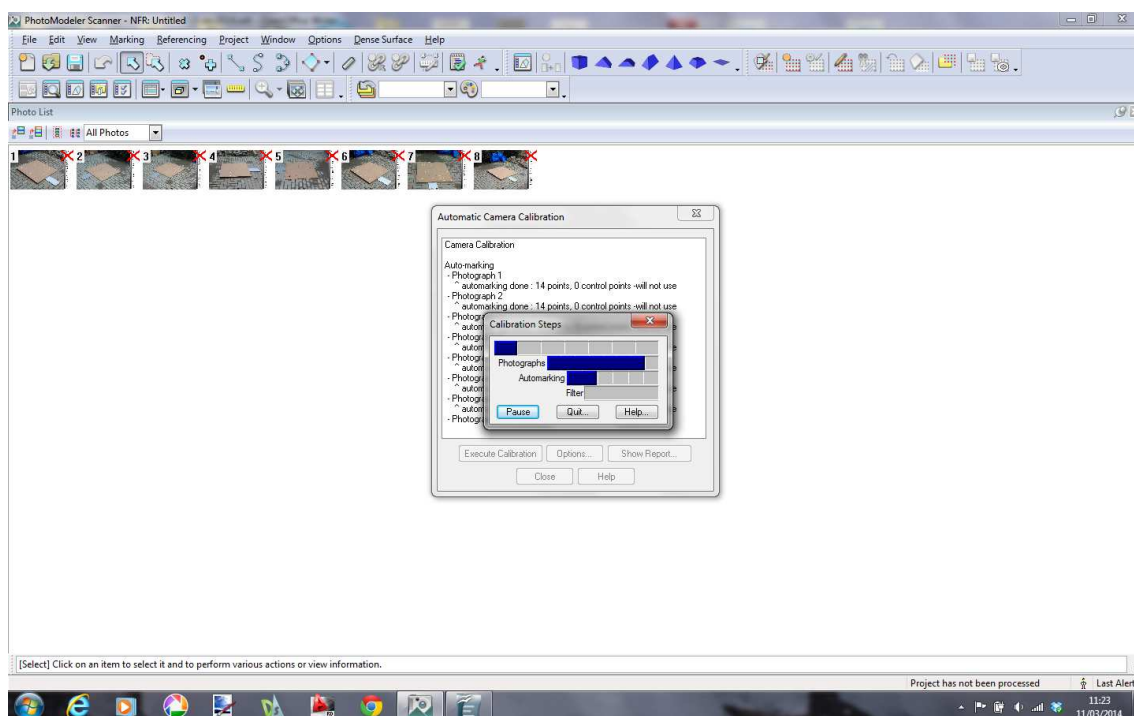


Immagine 39: screenshot del programma di calibrazione

## Agisoft

Agisoft LLC è un gruppo che si occupa dal 2006 di sviluppo di applicazioni di modellazione 3D e di soluzioni cartografiche basate su tecnologie di visualizzazione virtuale.

Nello specifico, Agisoft ha sviluppato applicazioni nei seguenti ambiti:

Analisi di immagini statiche:

- riconoscimento degli oggetti
- classificazione e verifica degli oggetti
- parametrizzazione dell'immagine tramite analisi PCA
- riconoscimento ed individuazione dei punti
- analisi geometrica del colore e della texture

Elaborazione ed analisi video:

- riconoscimento degli oggetti statici
- riconoscimenti degli oggetti dinamici
- riconoscimento della perdita dati

Tecnologie 3D:

- ricostruzione stereoscopica di dense nuvole di punti

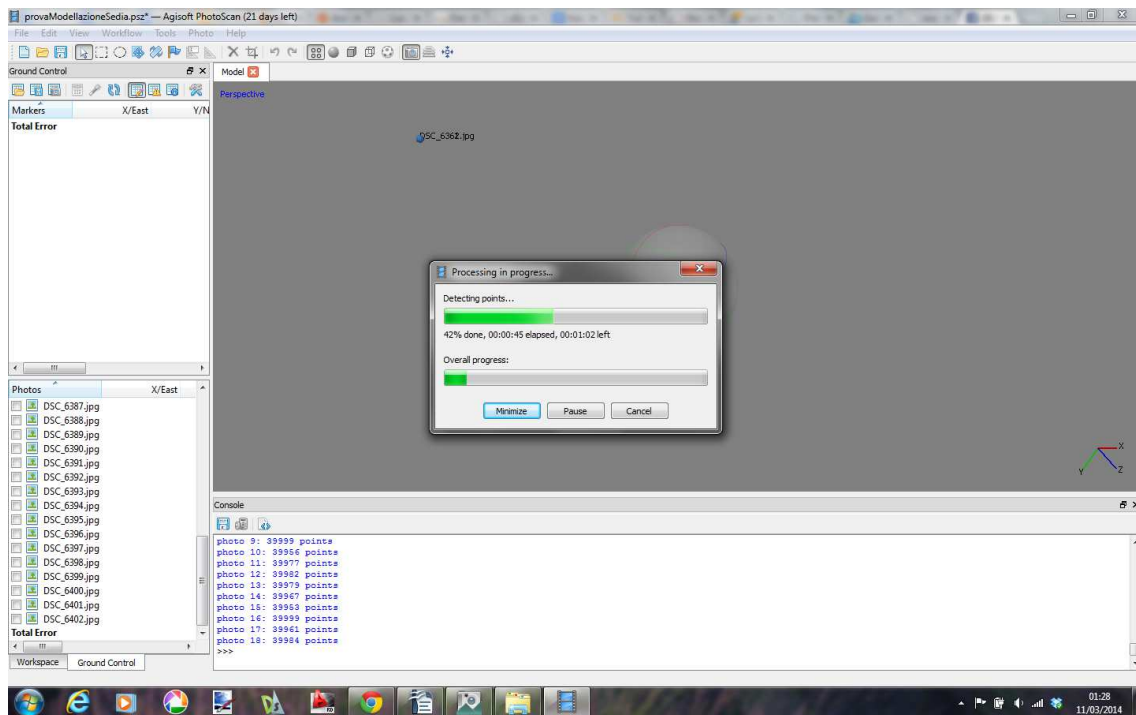
## •Morphing 3D

La maggior parte degli algoritmi implementati sono ottimizzati per applicazioni in tempo reale, possono ottenere dati da fonti diverse in molti formati, sono stati testati e regolati in molte configurazioni differenti e configurazioni. Usando queste tecniche, le tecnologie esistenti costituiscono la base completa per l'elaborazione delle immagini.

È un software per la fotogrammetria "close range" e aerea che permette di generare in automatico modelli 3D, completi di texture del colore, a partire da un set di immagini fotografiche delle quali si conosce l'origine. Le caratteristiche della camera infatti sono già inserite nel database ed è sufficiente selezionare il prodotto commerciale per correggere in automatico le distorsioni dovute alla camera stessa.

Si tratta di uno strumento che si avvale della strategia "Structure From Motion" (SFM), che consente di orientare automaticamente un set, anche molto grande, di immagini e di generare una nuvola di punti densa dell'oggetto documentato.

"Structure From Motion" fotogrammetria e automatismo. Questi strumenti derivano dalla convergenza di discipline differenti: da una parte la Computer Vision, che ha come obiettivo l'automatismo nella generazione dei modelli 3D; dall'altra la fotogrammetria, che ha come finalità la documentazione misurabile dell'oggetto. In effetti il modello che viene generato, se corredato dall'inserimento di una misurazione appartenente all'oggetto o al suo contesto, fornisce un modello misurabile e corredato di textures.



*Immagine 40: Agisoft in fase di elaborazione delle immagini termiche del pannello di calibrazione.*

Si mostrano di seguito gli screen-shot della procedura di seguita per l'acquisizione delle immagini da parte dei due programmi per i quali sono state eseguite le prove di calibrazione.

## **LA TECNOLOGIA “LOW COST” PER EFFETTUARE IL RILIEVO CON STRUMENTAZIONE DI BASE**

Come già più volte accennato il problema principale della elaborazione geometrica corretta del dato termico è dovuto al fatto che il rilievo, in esterno o in interno, viene effettuato in presenza di intonaco o altri elementi murari non eliminabili. Diversamente potendo infatti, si ricadrebbe nelle modalità di rilievo di tipo distruttivo. L'obiettivo qui è invece quello di non intaccare il supporto ultimo della parete o dell'elemento murario scelto e di poter integrare il rilievo fotografico e l'elaborazione che viene già da molti decenni effettuata con la tecnica della fotogrammetria, con il dato geometrico di ciò che non si può vedere a occhio nudo perchè posizionato nello strato immediatamente seguente/interno a quello visibile.

La premessa ulteriore che si ritiene necessario fare è che in commercio esistono moltissime differenti termocamere, dotate di caratteristiche spesso molto differenti tra loro, e che sarebbe impossibile individuare un sistema che “uniformi” a partire dal dato tecnico della termocamera, il risultato finale del rilievo.

Pertanto si è pensato di inventare un sistema che consenta di sovrapporre correttamente i dati geometrici, per qualsiasi combinazione di termocamera-fotocamera, l'immagine termica rispetto a quella fotografica.

A tal proposito si sono tenuti in considerazione tutti i rilievi termici effettuati, con vari materiali di riferimento, per la costruzione del pannello di calibrazione.

Sono stati costruiti in laboratorio di falegnameria e in laboratorio di taglio a controllo numerico e laser dei “marker” dei è opportuno elencare le caratteristiche.



Essi sono costituiti da due materiali differenti: il supporto è in pannello di mdf, di spessore non superiore a 3 mm, e forma regolare quadrata; gli elementi sovrastanti sono di varie tipologie.

Il supporto in mdf viene sistemato sulla parete o sulla superficie da rilevare, mediante semplice biadesivo di ridotto spessore.

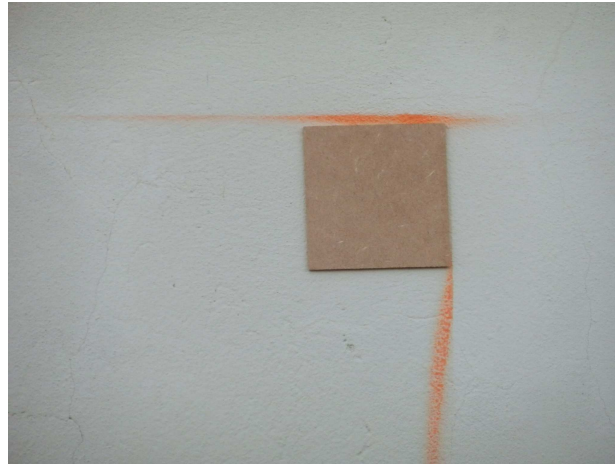
In questa fase occorre fare bene attenzione a non sottoporre gli elementi di alluminio a fonti di calore differenziata sulla superficie (ad esempio toccando per un tempo prolungato con la mano o le dita, queste lasceranno la loro impronta termica sull'oggetto, per molto tempo), alterando così l'immagine termica. In caso invece sia necessario evidenziare ulteriormente i marker, diventa utile riscaldare uniformemente il marker stesso, così da evidenziare le differenti emissività dei materiali che lo compongono (mdf  $\epsilon = 0,87$ , alluminio  $\epsilon = 0,10$ ). In questo caso comunque occorre fare molta attenzione al fatto che le superfici non raggiungano l'equilibrio termico. In tale condizione non si potrebbero, come per la superficie oggetto di rilievo, effettuare analisi sulle emissività.

Si specifica comunque che è più frequente il caso di equilibrio termico per temperature molto basse, piuttosto che per temperature medie o medio alte.

Si aggiunga poi, come specificato nelle caratteristiche tecniche della termocamera, che la termocamera ha un campo di rilevazione e che, per temperature prossime ai limiti superiore e inferiore del campo (fondo scala), la misurazione perde di qualità e definizione.

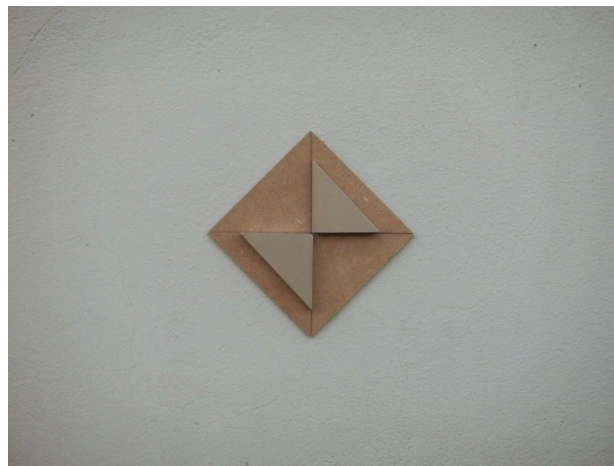
Si descrivono brevemente le caratteristiche dei marker costruiti, sottolineando che le dimensioni totali e delle sue componenti sono state ottimizzate per essere utili sia a distanze contenute sia a distanze elevate dal punto di presa.

La prima tipologia è priva di elementi di emissività differente. Questo marker è ideale per riprese di grandi superfici da distanze "limite".



*Immagine 41: foto di marker piano neutro in mdf sp. <3 mm, per rilievi a distanza medio-elevata*

Il secondo marker, collocabile a seconda delle esigenze, a diagonali verticali - orizzontali o con lato paralleli al terreno, è adatto a prese da distanze medie 1-4,5 metri. Ha 2 elementi a base triangolare, di spessore indicativo inferiore a 10 mm, e realizzati in acciaio inox. Sono posizionati con i vertici dell'angolo retto a contatto, in modo da individuare geometricamente e termicamente il baricentro del marker. Obiettivo è che sia presa fotografica sia immagine termica riportino la posizione del baricentro con chiarezza e precisione geometrica.



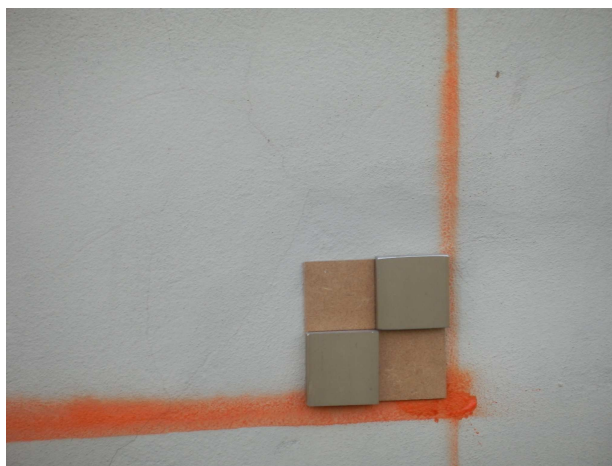
*Immagine 42: foto di marker piano in mdf sp. <3 mm, con elementi triangolari in alluminio a emissività differente.*

Lo stesso marker può essere disposto con rotazione di  $90^\circ$  rispetto all'immagine precedente, ovvero può avere i parallelepipedi di alluminio disposti alternativamente orizzontali o verticali. Questo perché, in presenza di sole molto inclinato rispetto alla parete da rilevare, o per inclinazioni elevate dell'asse di ripresa rispetto alla stessa, può risultare maggiormente utile il marker ruotato. Infatti, pur non avendo rilevato, durante le riprese termiche, un'incidenza negativa dell'ombra dovuta allo spessore, non è detto che questa, per prese ravvicinate, non possa interferire con l'identificazione su immagine termica del punto baricentrico del marker.



*Immagine 43: foto di marker piano in mdf sp. <3 mm, con elementi in alluminio a emissività differente. Disposizione alternativa.*

Il terzo marker, costruito con il medesimo obiettivo del marker precedente, ha due elementi a base quadrata con vertici retti che si posizionano sempre sul baricentro del marker.



*Immagine 44: foto di marker piano in mdf sp. <3 mm, con elementi iquadrati n alluminio a emissività differente.*

Il supporto riposta gli assi e le diagonali con linee di colore nero semplicemente disegnate e visibili, se ripresi anche con macchina di tipo amatoriale, nell'immagine fotografica.

La dimensione dei vari componenti è stata studiata per ottenere una buona visibilità del marker a distanze utili sia per la ripresa fotografica che per quella termica. Quest'ultima infatti fornisce dati significativi al fine del presente studio solo al di sotto dei 7 metri di distanza dal supporto indagato.

La costruzione e i vari test dei marker hanno seguito la procedura di tipo scientifico utilizzata per il pannello di calibrazione.

Si riportano di seguito le sequenze di immagini che forniscono evidenza di come i marker siano "visti" dalla termocamera, sia come immagine *ibrida (I)*, ovvero immagine termica sovrapposta in semi-trasparenza all'immagine fotografica, come immagine *termica (T)* e come immagine *fotografica (F)* da termocamera, che comunque ha una definizione differente dalle immagini fotografiche come riportate sopra e riprese da macchina fotografica Olympus SZ20.

#### Marker tipo 1

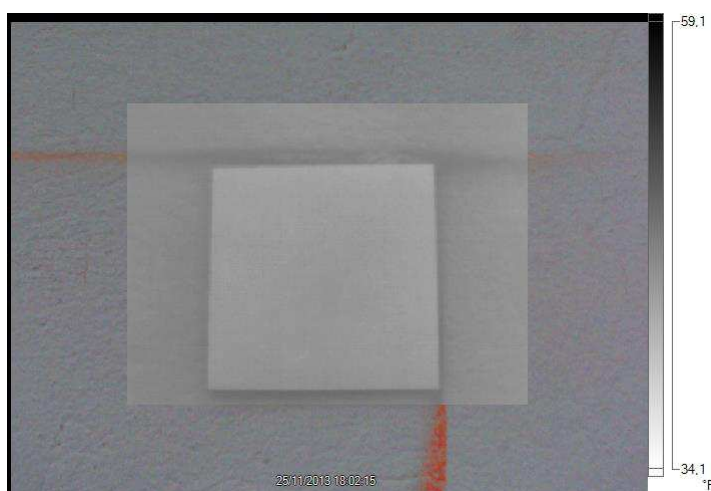


Immagine ibrida (I)

*Immagini 45: marker piano in mdf sp. <3 mm.*

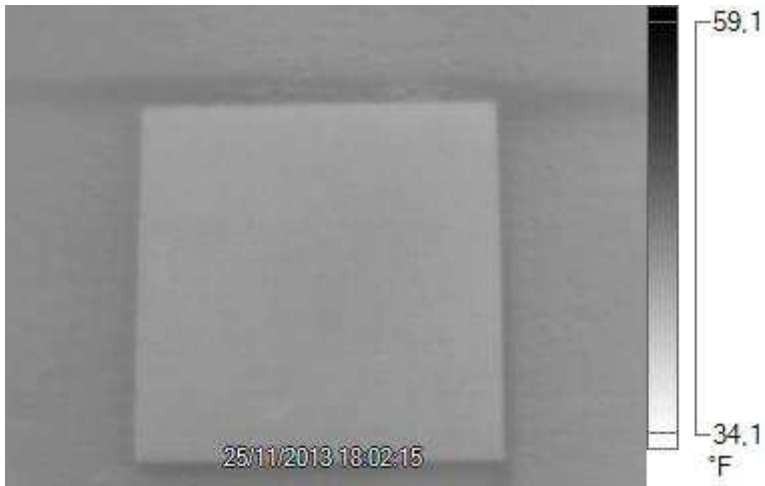


Immagine termica (T)

*Immagini 46: marker piano in mdf sp. <3 mm.*

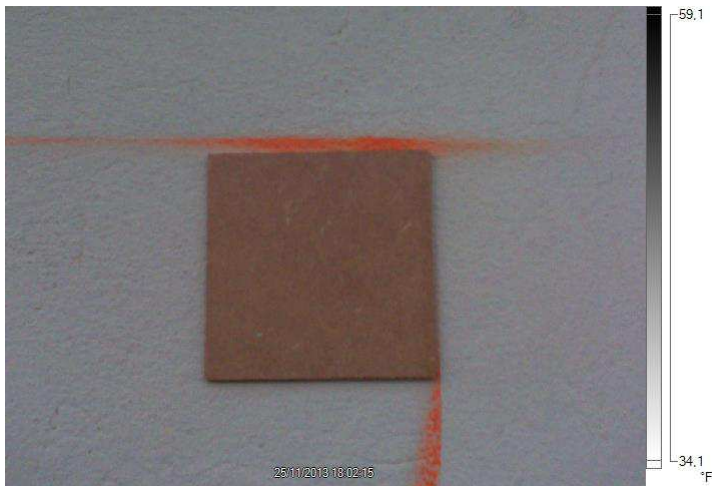


Immagine fotografica (F)

*Immagini 47: marker piano in mdf sp. <3 mm.*

Marker tipo 2

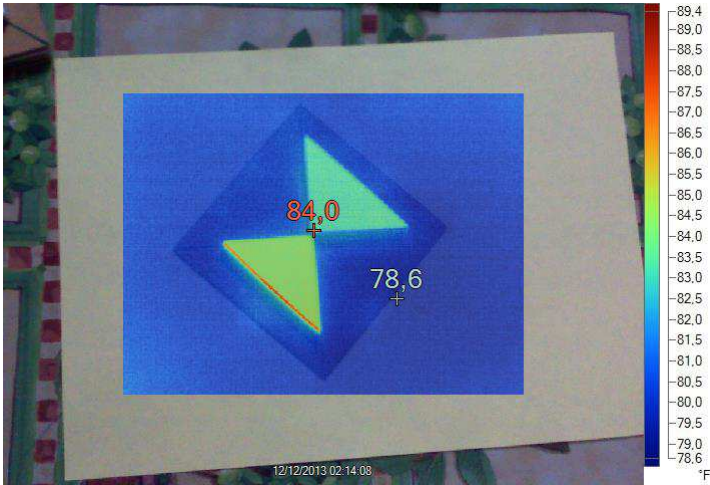


Immagine ibrida (I)

Immagini 48: marker piano in mdf sp. <3 mm. con triangoli alluminio

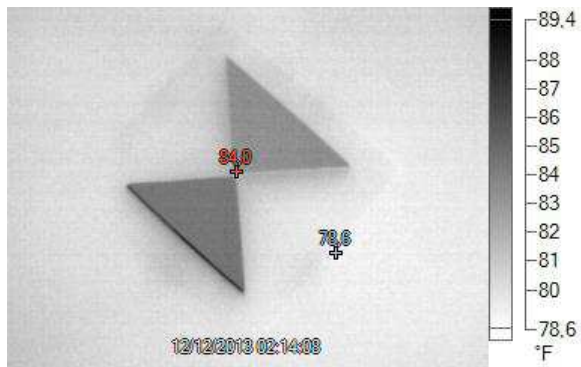


Immagine termica (T)

Immagini 49: marker piano in mdf sp. <3 mm. con triangoli alluminio



Immagine fotografica (F)

Immagini 50: marker piano in mdf sp. <3 mm. con triangoli alluminio



Marker tipo 3



Immagine ibrida (I)

Immagini 51: marker piano in mdf sp. <3 mm. con quadrati in alluminio

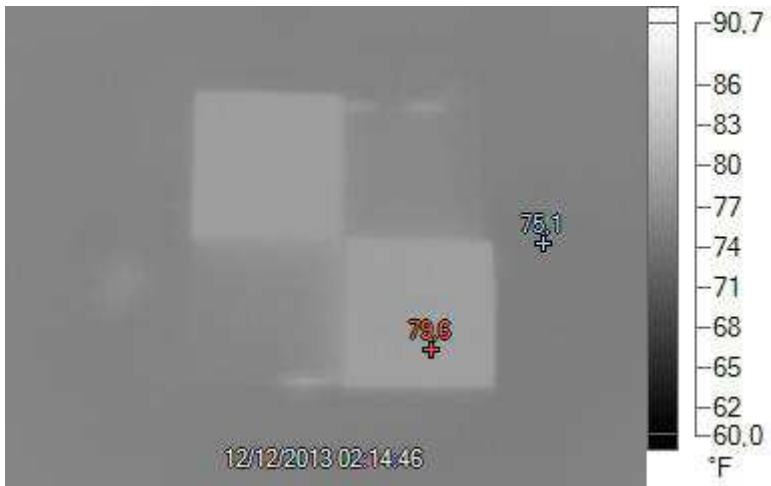


Immagine termica (T)

Immagini 52: marker piano in mdf sp. <3 mm. con quadrati in alluminio



Immagine fotografica (F)

Immagini 53: marker piano in mdf sp. <3 mm. con quadrati in alluminio

## **EFFETTUAZIONE DEL RILIEVO SUL TEMA DI STUDIO SCELTO**

In riferimento a quanto descritto nel capitolo precedente, si rileva che sono stati eseguiti i seguenti procedimenti, di operazioni di calibrazione, ove questo è stato possibile:

- calibrazione dell'ottica termica e acquisizione dei dati per la correzione della distorsione – eseguita su Fluke TiR32 ma riproducibile su qualsiasi altra termocamera della quale siano noti i dati tecnici.
- calibrazione della camera fotografica della termocamera Fluke TiR32 – eseguibile con la medesima procedura per qualsiasi camera di termocamera della quale siano noti i parametri e i dati tecnici
  - calibrazione di fotocamera amatoriale Olympus SZ20 eseguibile con la medesima procedura per qualsiasi camera, sia di tipo amatoriale sia di tipo professionale, della quale siano noti i parametri e i dati tecnici. Si sottolinea che per l'elaborazione mediante Agisoft la calibrazione potrebbe essere automatica individuando e selezionando il modello di camera utilizzata, in quanto il programma è dotato di database molto esteso per effettuare la calibrazione ex-post della maggior parte delle macchine fotografiche esistenti in commercio.

L'edificio scelto come oggetto di rilievo è un vecchio (per non dire antico) fabbricato ad uso agricolo delle campagne del Comune di Vignola (MO), che è stato scelto anche per la possibilità concreta di poter provvedere alla sua demolizione parziale al fine di effettuare il confronto tra il dato misurato indirettamente ed elaborato in software e il dato reale costruito.

Era necessario poter effettuare questa verifica finale sulle effettive dimensioni degli oggetti indirettamente rilevati, per dimostrare che il rilievo di tipo indiretto effettuato con questa tecnica e queste modalità può ragionevolmente essere



annoverato tra i rilievi di tipo non distruttivo per accuratezza e precisione anche geometrica nella restituzione del dato.

Importante è stato anche definire, pur nella circoscrizione del presente studio, quali tipi di elementi sono identificabili correttamente al di sotto del paramento dell'intonaco, quale tipo di dato era rilevabile e quali fossero le condizioni ambientali interne e/o esterne che possono ottimizzare detta misurazione.

Per questo i rilievi sono stati eseguiti in varie condizioni, i cui risultati sono stati tutti verificati e confrontati ex-post.

Sono state effettuate indicativamente oltre 300 prese fotografiche e termiche significative, e si è provveduto a scartare quelle che non rispettavano i criteri che sono stati via via definiti come migliorativi al fine di ottenere immagini utili.

Inizialmente il primo problema riscontrato nella fase di verifica del funzionamento della termocamera è stato quello di capire in che misura le condizioni ambientali potessero alterare l'acquisizione delle immagini.

In questo senso sono state effettuate numerose prove, in differenti condizioni atmosferiche esterne.

L'area sottoposta a rilievo termico-fotografico è stata ripresa in varie condizioni di umidità e temperatura. Si riportano i dati seguenti:

- r.01/09-2013: temperature esterna 31° temperatura interna 25° umidità relativa esterna 62° - parete esposta a pieno soleggiamento;
- r.02/09-2013: temperature esterna 25° temperatura interna 24° umidità relativa esterna 62° - parete esposta a soleggiamento diurno ma durante la fase di tramonto
- r.03/09-2013: temperature esterna 20° temperatura interna 23° umidità relativa esterna 62° - parete esposta a soleggiamento diurno ma durante la mattina prima delle ore 9,00
- r.04/09-2013: temperature esterna 23° temperatura interna 22° umidità relativa esterna 90° - parete esposta a moderato soleggiamento diurno ma durante evento piovoso

- r.05/09-2013: temperature esterna 23° temperatura interna 22° umidità relativa esterna 68° - parete esposta a illuminazione diffusa per presenza di cielo coperto – tarda mattinata
- r.06/09-2013: temperature esterna 24° temperatura interna 22° umidità relativa esterna 68° - parete esposta a illuminazione diffusa per presenza di cielo coperto – pomeriggio orario vespri

Per ognuna delle condizioni sopra elencate sono stati eseguiti numerosi rilievi, a varie distanze e inclinazioni rispetto al piano oggetto di rilievo, che si possono schematizzare come da tabella seguente. Si sottolinea che la “X” nel riquadro indica che l'immagine è stata correttamente acquisita sia in modalità fotografica sia in modalità termica. La presenza di “T” o “F” indica quale delle immagini risulta correttamente acquisita. Il campo vuoto indica l'assenza di indicazioni utili. Le osservazioni su questa parte sono riportate nel capitolo successivo.

ANGOLO/DISTANZA	0°	30°d x	30°sx	45°dx	45°sx	>60° dx	>60°sx
1m	X	X	X	X	X	T	T
1,50m	X	X	X	X	X	X	X
2m	X	X	X	X	X	X	X
2,50m	X	X	X	X	X	X	X
3m	X	X	X	X	X	X	X
3,50m	X	X	X	X	X	X	X
4m	X	X	X	X	X	X	X
4,50m	X	X	X	X	X	X	X
5m	X	X	X	X	X	X	X
5,50m	X	X	X	X	X	F	F
6m	X	X	X	F	F	F	F
6,50m	F	F	F	F	F		

Schema 6: matrice delle combinazioni di rilievo

L'osservazione e l'elaborazione delle immagini, per le quali si può affermare di aver verificato la possibilità di acquisizione nelle condizioni elencate precedentemente e con le modalità della tabella, consente di fissare i limiti di

acquisizione di questo tipo di immagini, in particolare da termocamera. Per le fotocamere, integrate o no, i dati coprono una gamma maggiore di combinazioni, che possono essere incrementate scegliendo camere in uso con prestazioni migliori. Si sottolinea che la termocamera, per sua tecnologia e funzionamento, non rileva il dato qui ricercato oltre una certa distanza e inclinazione.

A questo rilievo, che è stato eseguito per definire i limiti di applicabilità della procedura in termini di fruibilità dei dati rilevabili rispetto a distanza e inclinazione della presa, è seguito il rilievo vero e proprio effettuato, sul medesimo oggetto, ma previa installazione dei marker termo-fotografici costruiti. Lo stesso tipo di riprese “in campo utile” sono state perciò effettuate con le modalità e secondo la tabella che si riporta di seguito.

ANGOLO/DISTANZA	0°	30°dx	30°sx	45°dx	45°sx	>60° dx	>60°sx
1,50m	X	X	X	X	X		
2m	X	X	X	X	X		
2,50m	X	X	X	X	X		
3m	X	X	X	X	X	X	X
3,50m	X	X	X	X	X		
4m	X	X	X	X	X		
5m	X	X	X	X	X		
6m	X	X	X				

*Schema 7: matrice delle combinazioni di rilievo “utili”.*

Altra precisazione necessaria è quella relativa alle condizioni ambientali, che già sono state descritte. Non è possibile ottenere sempre le condizioni ottimali per il rilievo, ma a occorre saper valutare bene quali situazioni sono accettabili. In rilievo da interno è fondamentale valutare fonti di calore puntuali, la presenza di umidità nell'ambiente, o superficiale o interna all'oggetto. All'esterno invece i fattori di interferenza possono essere molto più influenti. Oltre a quelli indicati, sono particolarmente negativi la presenza di vento, pioggia o eccessivo e prolungato soleggiamento, elevata umidità, temperature tali da avere equilibrio

termico con l'interno (ad esempio in estate, per edifici non isolati, dopo ore di esposizione diretta al soleggiamento naturale).

Si aggiunga poi una sottolineatura, non del tutto relativa al tema svolto, ma che aiuta a meglio comprendere eventuali limitazioni della tecnica. La termocamera non ha possibilità di rilievo sul supporto quando la finitura della parete è rivestita con le piastrelle o con altri prodotti ceramici, in quanto eccessivamente lucidi e riflettenti.

Pertanto, prima di considerare l'uso della tecnica, occorre fare un'attenta verifica sulla possibilità che, oltre alle condizioni al contorno elencate come "interferenza! Per questa tecnica, non ci siano altri ostacoli che compromettano il risultato.

## **ELABORAZIONE DEL DATUM E RESTITUZIONE GRAFICA**

La parte centrale della presente trattazione è finalizzata all'ottenimento di dati geometrici di rilievo al di sotto dell'intonaco, che possano essere correttamente rappresentati su un modello tridimensionale dell'oggetto rilevato.

Per ottenere questo si sono pertanto eseguite più e più volte le medesime fasi di elaborazione delle immagini, di raddrizzamento fotografico, di sovrapposizione di immagine fotografica e termica mediante i programmi in dotazione agli strumenti, ma anche mediante i programmi già citati di elaborazione tridimensionale delle immagini acquisite del medesimo oggetto.

Si è ritenuto opportuno stabilire una sequenza di azioni, definibile, dati i risultati ottenuti, come tecnologia e procedura abbinata, che possiamo schematizzare di seguito

Per ogni strumento utilizzato e per ogni ottica relativa si procede alla ripresa, come da procedura indicata nel capitolo apposito, del pannello di calibrazione, in modo da poter ottenere i dati di calibrazione per la correzione della distorsione dell'ottica termica, dell'ottica fotografica integrata alla termocamera, della macchina fotografica amatoriale. Questa operazione va eseguita una sola volta per ogni strumento di ripresa.

A questo punto siamo in possesso dei dati che consentono di eliminare gli errori delle immagini dovuti alle caratteristiche del prodotto utilizzato. È fondamentale che questa operazione sia eseguita utilizzando il pannello di calibrazione foto-termico costruito con i criteri già descritti, in particolare quando le prese sono effettuate da termocamera con fotocamera integrata, e comunque usato sempre per la termocamera.

1. Acquisizione delle singole immagini, sul programma di calibrazione-elaborazione, suddivise per immagini termiche e immagini

fotografiche del medesimo oggetto, e correzione della distorsioni in base ai parametri della camera considerata.

2. Identificazioni delle immagini calibrate adatte all'elaborazione tridimensionale e loro selezione.
3. Creazione del progetto tridimensionale
4. Elaborazione automatica delle immagini
5. Creazione dei due modelli tridimensionali da immagini termografiche e da immagini fotografiche.
6. Identificazione e misurazione degli elementi architettonici sotto intonaco.

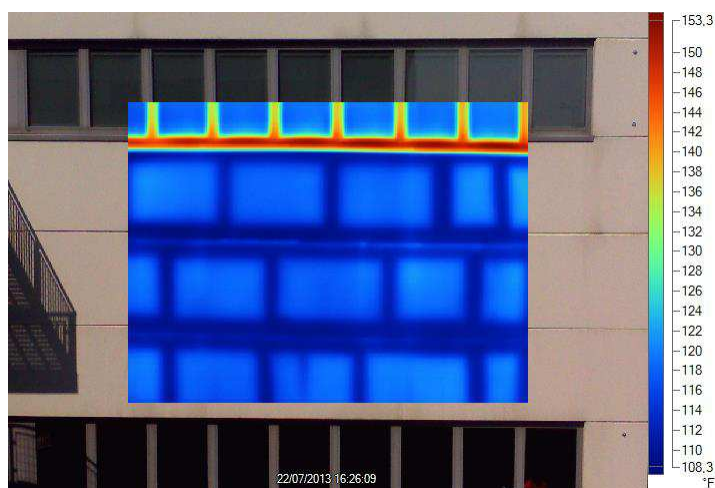
In alternativa, quando è necessaria la sola ricostruzione bidimensionale o per avere un immediato riscontro sull'identificazione degli elementi sotto intonaco, si segue invece la procedura identificata di seguito.

- Acquisizione delle singole immagini, sul programma di calibrazione-elaborazione, suddivise per immagini termiche e immagini fotografiche del medesimo oggetto, e correzione della distorsioni in base ai parametri della camera considerata.
- Accoppiamento delle immagini termica e fotografica (o da termocamera con fotocamera integrata, o da fotocamera) della medesima ripresa.
- Calibrazione della coppia di immagini,effettuata mediante software.
- Inserimento (se in possesso di più di una immagine per definire e riprendere lo stesso oggetto, di dimensioni considerevoli o di caratteristiche tali da richiedere più immagini per la completa ripresa dei dati)
- Sovrapposizione delle immagini termica e fotografica, con modalità in semi trasparenza, al fine di ottenere sovrapporre dati geometrici e dati termici.
- Raddrizzamento fotografico e creazione del modello dal quale identificare materiali e geometria.

Occorre comunque scegliere tra le due procedure anche in base al numero delle riprese effettuate, al fine di ottimizzare il lavoro. in maniera più estesa le

singole voci qui rappresentate. La descrizione può essere ragionevolmente considerata alla stregua di un manuale di uso della tecnologia, e ha il fine di evitare la maggior parte degli errori che l'operatore, procedendo per tentativi successivi e correzioni iterative, inevitabilmente si troverebbe a compiere.

Si riportano di seguito alcune sequenze di immagini termiche e fotografiche per mostrare le tipologie di oggetti rilevabili, le caratteristiche identificabili e gli elementi riconoscibili dalle immagini termiche.



*Immagini 54-55: facciata di edificio in pannelli prefabbricati con marcatura termica dei pannelli.*

Dal raffronto delle figure 51 e 52 si può dedurre che l'immagine termica, nonostante la ripresa sia effettuata senza alcuna preparazione e/o alterazione dell'ambiente intermedio, restituisce alcuni elementi:

- infissi in alluminio,definiti con colore arancio-rosso
- definizione geometrica dei pannelli e dei loro giunti, identificati con colorazione fredda maggiormente marcata (periodo del rilievo: inizio autunno)

Si evidenzia comunque il mancato allineamento automatico dell'immagine termica e di quella fotografica.



*Immagini 56: porzione di edificio in rilievo notturno.*

Nell'immagine ibrida riportata il rilievo in notturno di un edificio. Si comprende come, in determinate situazioni, il rilievo sia possibile anche in assenza di illuminazione naturale. In particolare di evidenziano:

- posizione di travi al di sotto della finitura di intonaco (ponti termici strutturali)
- posizione dei pilastri al di sotto dell'intonaco (ponti termici)

In questo caso, effettuando il foto-raddrizzamento dell'immagine, ovvero potendo creare il modello tridimensionale, di può rappresentare la struttura portante dell'edificio come da rilievo termico.



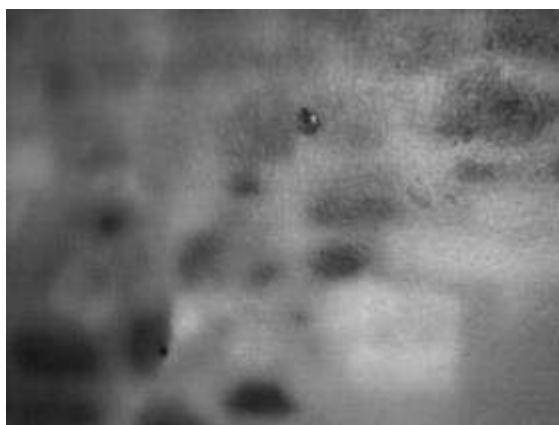


*Immagini 57: porzione di parete intonacata in immagine termica.*

Nell'immagine termica di parete interna intonacata si possono chiaramente identificare i seguenti elementi:

- orditura in mattoni semipieni
- alternanza di alcune aree con mattoni pieni
- orditura in sassi di fiume con malta interconnessa

Segue l'immagine corretta e raddrizzata mediante il programma, dalla quale, posizionando opportunamente i riferimenti, si possono ricavare dati aggiuntivi, come il rilievo degli elementi riconoscibili al di sotto dell'intonaco.



*Immagini 58: porzione di parete intonacata in immagine termica corretta e raddrizzata*

L'immagine termica raddrizzata con apposito programma, restituisce, al di sotto dell'intonaco, l'immagine del supporto.

Si possono individuare chiaramente, anche dal punto di vista dimensionale, gli elementi al di sotto degli intonaci.

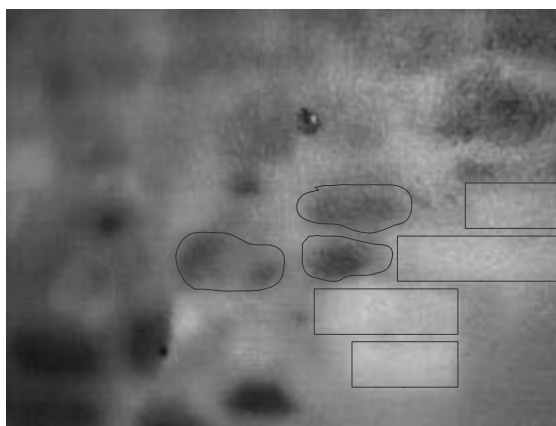
Si sottolinea una particolarità riscontrata più volte nelle murature con supporto in sasso di fiume.

L'immagine termica, rilevata con punto di presa inclinato rispetto alla superficie, riporta, proprio per le aree con muratura in sasso, una definizione dei bordi e dei contorni molto più marcata, in presa inclinata, rispetto alla presa frontale.

Questa apparente anomalia può essere ragionevolmente giustificata considerando che la superficie del sasso di fiume, per quanto rettificata per l'uso strutturale portante all'interno di una parete, appare comunque incurvata ai bordi. Questa "curvatura" si percepisce meglio nelle immagini inclinate in quanto l'emissività del sasso, pur passando attraverso uno strato maggiore di malta/intonaco, si diffonde perpendicolarmente alla superficie laterale del sasso medesimo, quindi nella direzione, o con inclinazione ridotta, rispetto all'asse di presa di immagine, inclinato e angolato rispetto alla parete.

Questa particolarità richiede comunque un approfondimento di indagine, con conseguente classificazione delle modalità di rilievo, rispetto alle ipotesi di materiali del supporto, che non è stato possibile effettuare nel presente studio.

Di seguito si riporta il "rilievo" da immagine termica raddrizzata, degli elementi sotto intonaco, che sarà oggetto di confronto con l'immagine fotografica della medesima parete, ripresa in seguito a demolizione dell'intonaco in suddetta zona.



*Immagini 59: immagine termica con identificazione elementi*

Nel capitolo “Confronto con l'immagine ...” si riportano i dati geometrici rilevati, in seguito alla demolizione dell'intonaco, a confronto con quelli ipotizzati, per valutare l'attendibilità del dato rilevato.

## **DEFINIZIONE DEI PRINCIPALI PROBLEMI RILEVATI E IPOTESI DI LORO RISOLUZIONE**

I problemi principali che sono stati riscontrati durante tutte le fasi dello studio sono sintetizzabili come di seguito specificato.

Dall'osservazione e dal raffronto delle immagini acquisite, si possono rilevare i seguenti problemi, per i quali viene proposta relativa soluzione, da testare in fase di verifica finale prima della demolizione dell'intonaco.

Si elencano le problematiche riscontrate:

1. Distanza della parete intonacata rilevata rispetto alla capacità del sensore termico di rilevare le differenze di emissività dei materiali al di sotto dell'intonaco: limite di distanza dall'oggetto da rilevare, differenza per ogni tipo di termocamera utilizzata.
2. Inclinazione dell'asse di ripresa della termocamera rispetto alla perpendicolare alla superficie piana da indagare: al di sopra dei 60° l'immagine non è utilizzabile.
3. Combinazione di inclinazione e distanza, che riduce il campo visivo "utile" ai fini del rilievo.
4. Possibilità dei marker di essere modificati in forma e dimensione al variare di distanza e inclinazione della termocamera.
5. Pannello di calibrazione: trasportabilità, inalterabilità di forma dimensioni proporzioni, riproducibilità.

### **Problematica 1:**

La sensibilità del sensore termico si riduce, anche in condizioni ottimali e in assenza di fattori esterni che influiscano negativamente sul rilievo, all'aumentare della distanza. Infatti la dimensione e il numero dei pixel dell'immagine termica, è ridotta ed equivale ad una fotocamera di vecchia

generazione. In tal senso, all'aumentare della distanza, diminuisce la possibilità di individuare/visualizzare chiaramente gli elementi al di sotto dell'intonaco, in quanto la dimensione dell'oggetto può diventare di ordine di grandezza pari o superiore alla dimensione del pixel sull'immagine ripresa. In questo caso l'elemento non è identificabile perchè più piccolo del pixel stesso. Unica possibilità, a parità di definizione di immagine termica, è la riduzione della distanza del punto di presa dall'oggetto. Esistono termocamere in commercio con un numero di pixel superiore, che possono contribuire positivamente ad aumentare la distanza di presa. Il loro costo è decisamente molto elevato e pertanto dette macchine non possono essere considerate utilizzabili ai fini del presente studio, pensato proprio per ottimizzare costi e prodotto ottenuto.

### **Problematica 2:**

Nel caso le condizioni al contorno (presenza di ostacoli, piuttosto che rilievi in interno in stanze con dimensioni particolari o di ridotte dimensioni) non consentano di effettuare riprese frontali o con inclinazioni inferiori ai 60°, l'immagine termica risulta molto sfocata, proprio perchè la camera acquisisce un dato di emissività dal corpo/oggetto indagato, che è maggiormente leggibile se è direzionato perpendicolarmente alla camera di presa e all'oggetto stesso. L'emissività di un corpo è rilevabile da più angolazioni, ma il dato migliore è quello trasmesso e rilevato con le modalità descritte. Ad ogni rilievo si tratterà di valutare l'opportunità del dato ottenuto, in base al "desiderata", ovvero al dato richiesto e necessario per la comprensione dell'oggetto del rilievo

### **Problematica 3:**

Vedasi i punti precedenti. Nel caso di combinazione di entrambe le situazioni occorre valutare il dato ottenibile e la sua accettabilità.

### **Problematica 4:**

I marker, come precedentemente descritto, sono costituiti da un supporto in MDF di ridotto spessore, sul quale sono collocati dei solidi di alluminio. Lo spessore, sia dei solidi di alluminio, sia del supporto, potrebbe, per rilievi da distanza non eccessiva (inferiore a 3 metri) e inclinazione tra 45° e 60° costituire un problema in fase di riconoscimento dei marker su immagine termica, per effetto

dell'ombra generata dallo spessore. In questo caso si è pensato di realizzare degli elementi di alluminio di ridottissimo spessore (circa 1 mm), mediante taglio a controllo numerico, per evitare che la dimensione indicata desse problemi in caso di rilievi di questo tipo. Occorre però fare attenzione perchè lo spessore ridotto, in caso di variazioni termiche notevoli, può alterare la forma dell'oggetto. Per le distanze individuate come campo di rilievo nel presente studio non ci sono comunque difficoltà in questo senso, dato quanto già più volte espresso in riferimento alle dimensioni dei pixel della termocamera utilizzata.

#### **Problematica 5:**

Le dimensioni del pannello di calibrazione, in caso di utilizzo di programmi per i quali sia necessario introdurre le immagini riprese dalla camera del pannello per identificarne i parametri, possono essere un ostacolo. Si può pensare di ridurre le dimensioni del pannello scegliendo un numero più limitato di marker su di esso. La riduzione dello spessore del supporto, per poter avere un peso inferiore, non risulta applicabile infatti per la deformabilità che uno spessore ridotto potrebbe avere sia per variazioni termiche che per forma.

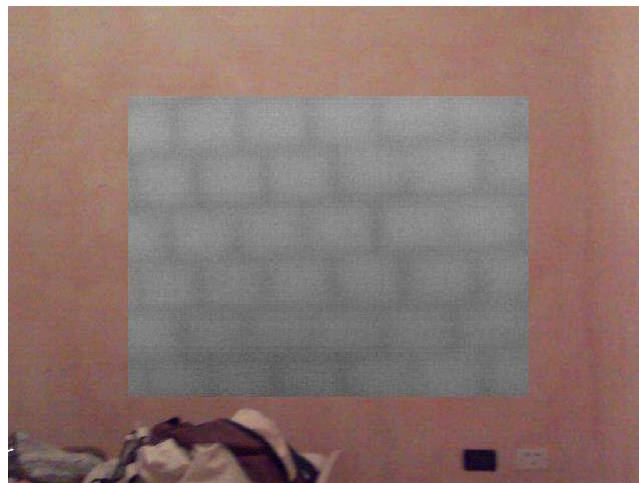
## **ELENCO DEGLI ELEMENTI RILEVABILI, IDENTIFICAZIONE DEI MATERIALI CHE COMPONGONO DETTI ELEMENTI**

Per verificare la correttezza geometrica dei dati rilevati mediante uso integrato di camera fotografica e termocamera (integrata e non) si è provveduto a verificare il dato rilevato mediante demolizione dell'intonaco delle parti di edificio rilevato, con successiva misurazione diretta degli elementi costituenti il supporto.

Si è potuto constatare che la possibilità di identificare correttamente la tipologia costruttiva è fattibile per alcuni tipi di materiali del supporto e per alcune tessiture murarie.

Le tipologie di materiali di supporto “visibili” e identificabili attraverso l'uso mediante termocamera sono stati:

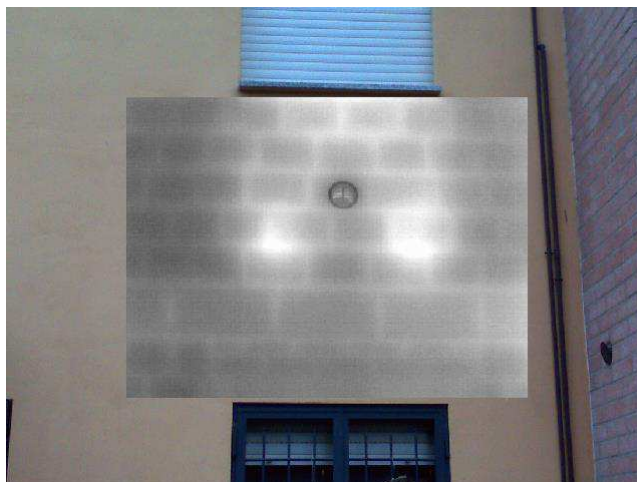
- muratura portante in blocchi tipo Porotherm



*Immagine 60: immagine termica con identificazione elementi in blocchi tipo Porotherm e filari di malta.*

In questa immagine si evidenziano i blocchi strutturali semi-forati tipo Porothon, utilizzati nella parete intonacata.

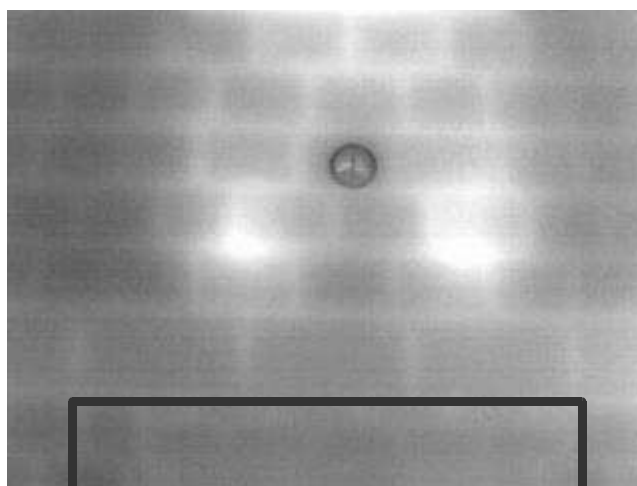
- cordolo perimetrale in elementi prefabbricati di calcestruzzo



*Immagine 61: immagine termica con identificazione elementi in blocchi tipo Porothon e filari di malta.*

Nell'immagine, ripresa dall'esterno del fabbricato, si possono vedere sia il corso strutturale del cordolo perimetrale di solaio,

- elementi strutturali come l'architrave prefabbricato della finestra

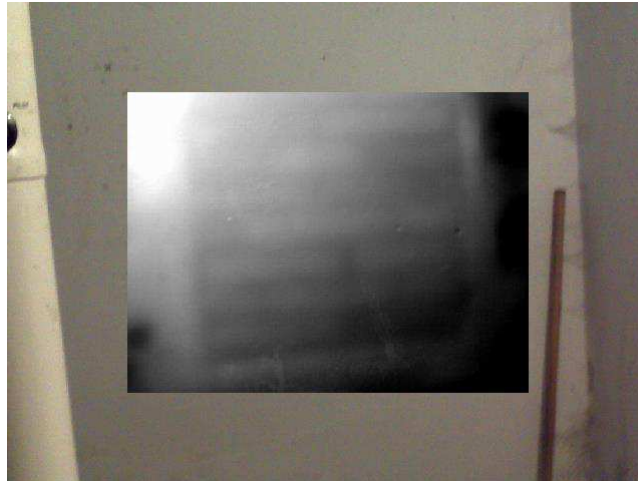


*Immagine 62: ingrandimento dell'immagine termica precedente, con identificazione elementi in blocchi tipo Porothon e filari di malta e architrave(in basso) della finestra sottostante.*



Nell'immagine, ripresa dall'esterno del fabbricato, si evidenziano due punti più chiari, che mostrano gli attacchi, presenti all'interno della parete, del termosifone collocato al di sotto della finestra.

- Orditura muraria composta da malta a base cementizia e mattoni semipieni



*Immagine 63: immagine ibrida con identificazione elementi in mattone semipieni e filari di malta.*

- Orditura muraria composta da sassi di fiume alternati ai materiali precedentemente elencati, ovvero muratura mista composta da elementi di muratura piena, semipiena, sassi di fiume



*Immagine 64: immagine termica con elementi in mattone semipieni, elementi di sasso di fiume, elementi in mattoni pieni (contorno finestra) e filari di malta.*

È poi stato possibile identificare e rilevare geometricamente anche gli elementi strutturali elencati di seguito.

- Identificazione e posizionamento corretto di solai parzialmente prefabbricati composti da travetti di cemento prefabbricati e pignatte (modalità costruttiva molto diffusa nei fabbricati ad uso civile dagli anni '60 in avanti)



*Immagine 65: immagine termica con travetti prefabbricati.*

- Posizionamento delle varie e differenti strutture portanti come pilastri in calcestruzzo armato



*Immagine 66: immagine termica ibrida con strutture portanti (travi-pilastri).*

– Posizione e identificazione della geometria superficiale di fessurazioni passanti, sia strutturali sia non strutturali. In questo caso è stato necessario aumentare la temperatura della stanza interna per aumentare il flusso termico diretto attraverso la fessurazione medesima, che, inizialmente, era visibile ma non nella sua interezza.



*Immagine 67: immagine termica ibrida con strutture portanti (travi-pilastri).*

Particolare attenzione è stata usata in questo ultimo caso, per verificare la possibilità di identificare, rilevare, le fessurazioni passanti su pareti, di tamponamento e portanti, al fine di aggiungere dati geometrici e strutturali alle analisi del degrado e alle descrizioni tecnico strutturali dello stato degli oggetti rilevati.



*Immagine 68: immagine termica di identificazione di fessurazione*

È importante sottolineare che il dato così identificato, in caso di termocamera con maggiore precisione di ripresa termico-emissiva, potrebbe dare informazioni anche nel caso di fessurazioni poco visibili a occhio nudo, fratture interne, o presenti nella parte opposta della parete (vedi immagine 68).

## **CONFRONTO CON L'IMMAGINE RETTIFICATA OTTENUTA DA TERMOCAMERA DI ALTA GAMMA CON SOVRAPPOSIZIONE AUTOMATICA DELLE IMMAGINI – VALUTAZIONE DELL'EVENTUALE ERRORE**

In questo capitolo vengono rappresentati i risultati più significativi del lavoro svolto. In particolare l'obiettivo finale che è stato raggiunto è quello di aver ottenuto un'immagine unica applicando le seguenti fasi:

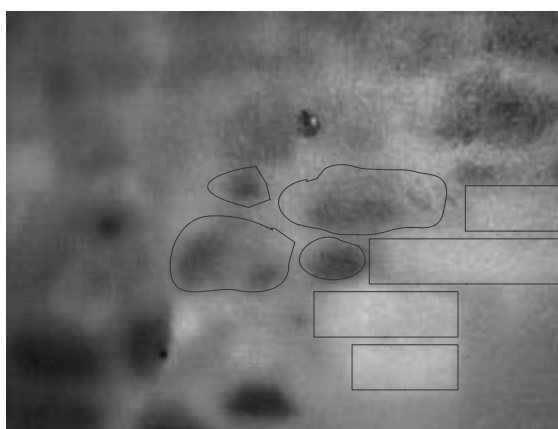
1. installazione sulla parete interessata di marker;
2. acquisizione delle immagini termica e fotografica dell'oggetto;
3. correzione della distorsione della camera fotografica;
4. correzione della distorsione dell'immagine termica;
5. sovrapposizione delle due immagini mediante utilizzo dei 4 o più punti omologhi individuati mediante i marker;
6. foto-raddrizzamento dell'immagine;
7. misurazione indiretta dall'immagine;
8. verifica delle misurazioni effettuate previa demolizione dell'intonaco e misurazione diretta;
9. osservazione sulla corretta identificazione dei materiali costituenti il supporto e della tecnica costruttiva utilizzata;
10. valutazione dell'errore di misurazione indiretta rispetto a quella diretta;
11. accettabilità del dato geometrico;
12. ricostruzione tridimensionale dell'oggetto rilevato mediante unione iterativa delle varie pareti rilevate;
13. apposizione di palette atte a rappresentare simbolicamente struttura e tecnologia costituente il supporto.

Si riportano di seguito le immagini di presa, termica e fotografica, le immagini corrette in seguito alla calibrazione, le immagini dopo il raddrizzamento fotografico, la sovrapposizione delle immagini al fine di evidenziare l'utilità del

dato geometrico rilevabile sovrapponendo la termo-immagine corretta e raddrizzata sull'immagine fotografica. Segue poi il rilievo geometrico del supporto murario sotto intonaco ricavato dall'immagine frutto della sovrapposizione.

Si è provveduto alla demolizione dell'intonaco in una delle parti oggetto del rilievo termico e fotografico, alla ripresa fotografica del supporto privo di intonaco, alla misurazione diretta di alcuni elementi caratteristici nelle due dimensioni significative.

Si è eseguita la sovrapposizione in semitrasparenza delle immagini ottenute con il raddrizzamento fotografico e si indicano di seguito le osservazioni in merito.



*Immagine 69: immagine termica di identificazione di elementi in muratura e sasso*

Si è provveduto alla misurazione geometrica diretta degli elementi e al confronto con la misura rilevata direttamente da immagine termica calibrata e foto-\*raddrizzata, ottenendo le seguenti osservazioni.



*Immagine 70: immagine fotografica dopo la demolizione dell'intonaco*

Il confronto delle immagini fa notare come gli elementi siano stati identificati sia come forma (anche quando abbastanza irregolare) sia come materiale.

Dal punto di vista dimensionale, si evidenzia come l'immagine termica sia comunque non del tutto precisa. In questo caso sono state utilizzate, per la identificazione delle forme dei sassi di fiume, più immagini, in particolare quelle con presa non ortogonale. In effetti, mentre per quanto riguarda le forme regolari come i mattoni pieni o semipieni, anche la definizione geometrica è abbastanza corretta, è per quanto riguarda i sassi di fiume, in particolare quelli di dimensioni ridotte, risulta più difficoltoso trovare corrispondenza, pur essendo chiara l'identificazione tipologica.

Si noti come la malta, che è ottocentesca, sia rappresentata termicamente in modo del tutto simile a quella del sasso di fiume a faccia spaccata, mentre il sasso di fiume intero ha emissività del tutto differente, pur essendo altrettanto riconoscibile.

## **OSSERVAZIONI SULL'ACCETTABILITA' DEL DATO GEOMETRICO (PRECISIONE E ACCURATEZZA DEL DATO DA RILIEVO DEGLI ELEMENTI SOTTO L'INTONACO)**

In questo capitolo vengono rappresentati mediante forma tabellare i raffronti tra i dati della misurazione indiretta rispetto a quelli della misurazione diretta.

Seguono alcune osservazioni sull'accettabilità del dato in funzione della tipologia dello stesso e dell'uso che deve essere fatto della misurazione indiretta.

Si ricorda che questo tipo di rilievo può risultare particolarmente utile nello studio degli edifici storici e dei beni culturali, in quanto permette, entro i limiti rilevati e qui esposti, di effettuare un rilievo di supporti non visibili a occhio nudo, senza demolizioni, né parziali né totali, del paramento esterno.

In particolare si è rilevato che, utilizzando la procedura di cui al capitolo "Effettuazione del rilievo ..", ovvero provvedendo, in caso di equilibrio termico, al riscaldamento della parete, è possibile verificare la presenza e la consistenza di elementi murari al di sotto dell'intonaco e per un certo spessore. Infatti si sono potuti riscontrare le differenti orditure della metà muratura esterna rispetto alla metà muratura interna eseguendo in sequenza le fasi di riscaldamento e rilievo.

È stato possibile individuare le tipologie e ricostruirne l'orditura rilevando la parete con termocamera posta all'esterno, previo riscaldamento della parete stessa dall'interno del locale, e rilevando successivamente dall'esterno previo riscaldamento locale, la muratura dall'esterno e rilevando con termocamera.

Attraverso la verifica del valore dell'emissività di elementi apparentemente identici (ad esempio un corso di malta e di mattoni), è stato possibile anche identificare elementi di forma simile ma di composizione differente. Si può



pertanto approfondire la ricerca da questo punto di vista, identificando un ramo di studio che può avere l'obiettivo di distinguere, per piccole variazioni del dato termico-emissivo, i differenti materiali, a parità apparente di forma. Infatti l'emissività, ad esempio di un mattone pieno, rispetto ad un mattone delle medesime dimensioni, ma vuoto, entrambi rivestiti con il medesimo spessore di intonaco, risulta differente.

Dalla misurazione diretta delle unità rilevate si sono riscontrate alcune differenze dimensionali, in particolare in riferimento alle dimensioni dei sassi di fiume se ripresi con presa termica perpendicolare alla parete.

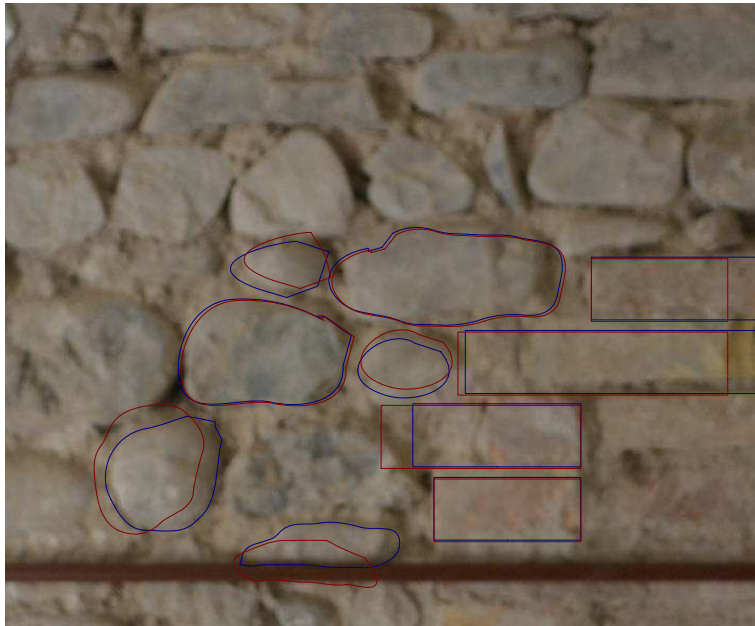
Come già precedentemente descritto, risulta molto meglio definito il contorno degli elementi irregolari, quando la presa è inclinata rispetto all'asse ortogonale.

La misurazione degli elementi rilevati al di sotto degli intonaci, con la procedura di calibrazione, foto-raddrizzamento e misurazione in base ad un riferimento (dimensione dei marker o altro), fornisce delle misurazioni geometriche che risultano sufficientemente precise rispetto alla posizione e alle reali forma e dimensioni degli elementi indagati.

Le misurazioni delle costruzioni in muratura, omogenee o miste, in opera o prefabbricate, si effettuano con unità "centimetro", più raramente del metro, Le tolleranze costruttive degli elementi in muratura sono considerate accettabili, in fase costruttiva, di rilievo, di ristrutturazione, se rientrano nell'ordine di 1cm di intervallo dalla misura effettiva.

Pertanto la presente valutazione è fatta con questa osservazione di base. Gli elementi rilevati nel dettaglio, anche in rapporto tra distanza, inclinazione e dimensione degli oggetti da rilevare, sono considerati correttamente e geometricamente rilevati se le dimensioni rientrano all'interno di questo intervallo di tolleranza.

A seguire si riportano i confronti tra le immagini termica e fotografica (post demolizione) con le misurazioni indirette e dirette effettuate.



*Immagine 71: immagine fotografica con raffronto tra elementi rilevati da termocamera (rosso) ed elementi identificabili da immagine fotografica corretta.*

L'immagine di raffronto fa notare come gli elementi in laterizio siano chiaramente e correttamente identificati, sia come posizione sia come forma e geometria.

Per gli elementi in sasso di fiume gli elementi vengono riconosciuti come forma e materiale, con qualche imprecisione (dell'ordine comunque del centimetro) nel posizionamento. Le ragioni di questo sono state descritte nel capitolo “elaborazione del datum...”

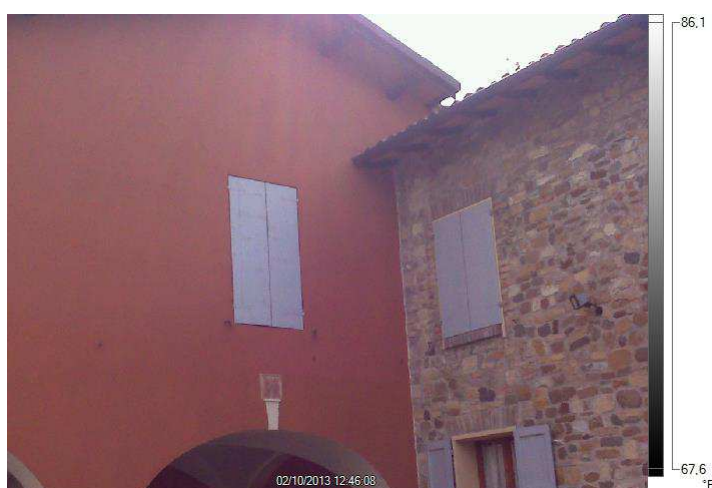
Infatti si ribadisce che questa apparente anomalia può essere ragionevolmente giustificata considerando che la superficie del sasso di fiume, per quanto rettificata per l'uso strutturale portante all'interno di una parete, appare comunque incurvata ai bordi.

La “curvatura” si percepisce meglio nelle immagini inclinate in quanto l'emissività del sasso, pur passando attraverso uno strato maggiore di malta/intonaco, si diffonde perpendicolarmente alla superficie laterale del sasso medesimo, quindi nella direzione, o con inclinazione ridotta, rispetto all'asse di presa di immagine, inclinato e angolato rispetto alla parete.

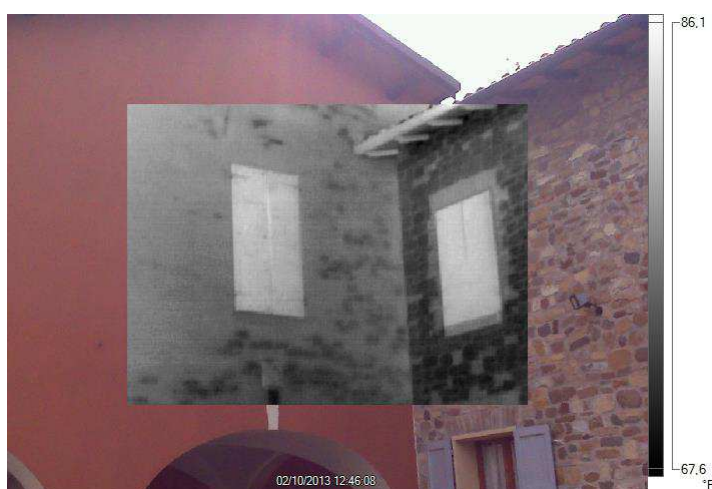
# UN CASO DI STUDIO – SPUNTI PER ULTERIORI APPROFONDIMENTI E UTILIZZI DELLA TECNICA

## Il muro interno di edificio storico

Si aggiungono di seguito alcune immagini particolarmente significative che aiutano a comprendere l'utilità della tecnica individuata al fine del corretto rilievo geometrico, tecnologico, dei materiali, e dell'analisi del degrado.



*Immagine 72: immagine fotografica edificio di impianto romanico*



*Immagine 73: immagine fotografica e termica (ibrida) di edificio di impianto romanico*



*Immagine 74: immagine termica di edificio di impianto romanico*



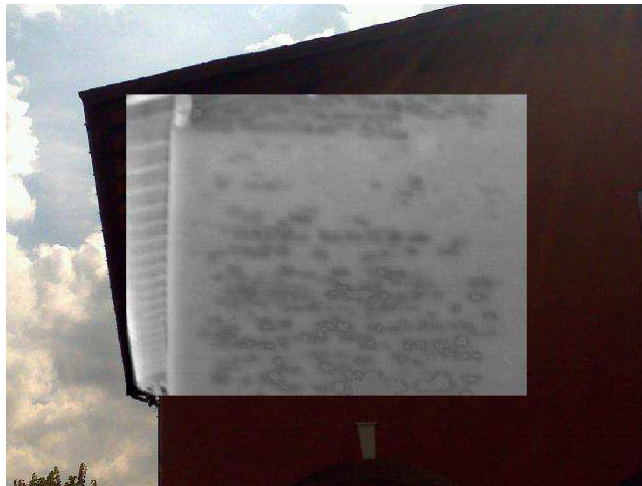
*Immagine 75: immagine fotografica di edificio di impianto romanico*



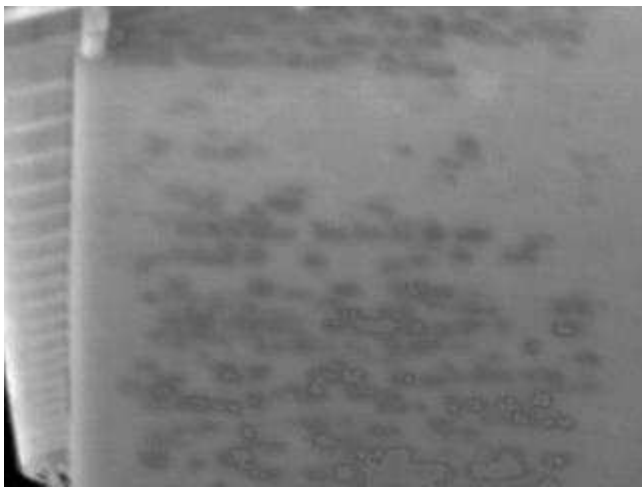
*Immagine 76: immagine ibrida fotografica termica di edificio di impianto romanico*



*Immagine 77: immagine ibrida fotografica termica di edificio di impianto romanico*



*Immagine 78: immagine ibrida fotografica termica di edificio di impianto romanico*



*Immagine 79: immagine termica di edificio di impianto romanico*

Queste immagini termiche, trattate con la tecnica descritta, consente di ottenere le immagini seguenti, dalle quali si possono rilevare materiali componenti del muro sotto intonaco, collocazione e corretta geometria degli stessi, con le osservazioni già effettuate.

La collocazione dei marker al di sopra di intonaci di pregio avviene mediante biadesivo nuovo di tipo spugnoso, che consente di non lasciare traccia dell'applicazione medesima su una superficie che deve essere oggetto di grande attenzione e cura.

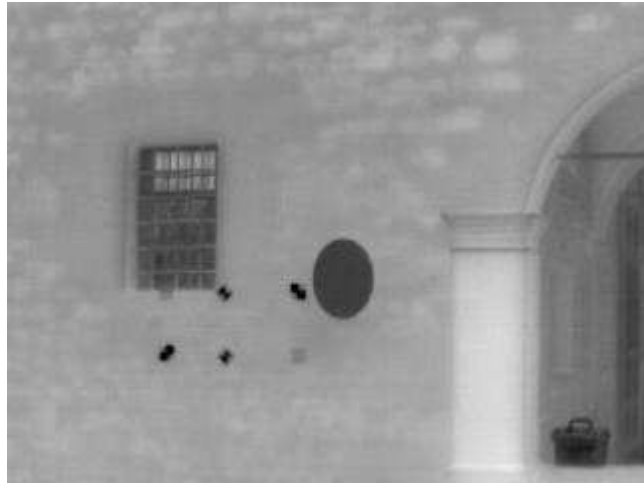
Segue un'esemplificazione di applicazione dell'applicazione dei marker sopra una porzione di edificio. La scelta della collocazione è stata fatta per avere comunque in questo caso, ancora in fase di elaborazione, per avere un ulteriore riscontro rispetto ai punti esterni identificabili sull'immagine. Il risultato può poi essere analogamente estrapolato ed applicato a superfici prive di riferimenti.

Questo rilievo integra, dal punto di vista delle informazioni ivi presenti, altri rilievi precedentemente realizzati con strumentazioni quali laser scanner e stazione totale. Seguono immagini con marker, relativa elaborazione delle immagini, identificazione degli elementi e della loro geometria.

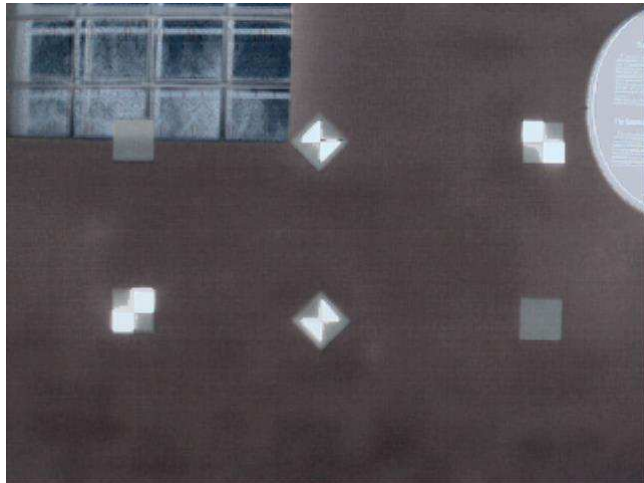


*Immagine 80: immagine ibrida fotografica termica di edificio di impianto romanico*





*Immagine 81: immagine termica di edificio di impianto romanico con marker posizionati*



*Immagine 82: immagine ibrida elaborata, con sovrapposizione a immagine fotografica – particolare -*

## CONCLUSIONI

Come mostrato nel capitolo “individuazione dei fattori che influiscono sul rilievo” occorre tener presente che il rilievo con termocamera di pareti intonacate appartenenti a beni culturali o edifici storici di pregio va effettuato cercando di ottimizzare le condizioni ambientali, sia esterne sia degli ambienti interni.

Se si riescono a valutare adeguatamente e a “controllare”, mediante l'uso di strumentazioni opportune (il termo-igrometro, l'anemometro etc.), dette condizioni esterne, il rilievo può essere predisposto per numerosi casi di studio.

Interessanti sono le potenziali applicazioni in integrazione con altre tecniche già ampiamente utilizzate, quali il rilievo con il laser scanner di un intero edificio, integrato con la foto-modellazione della eventuale parete interna o esterna intonacata.

Si aggiunga che, in caso di presenza di affreschi o elementi di intonaco non amovibili, è importante riconoscere gli elementi al di sotto, in particolare in caso di presenza di elementi di interesse storico (porte, aperture, materiali storici) o strutture, nel caso di adeguamenti strutturali dell'oggetto indagato.

Si sottolinea che vanno comunque indagati nello specifico le possibilità di ricavare dati in funzione degli spessori di intonaco. Infatti nei casi indagati nel presente studio, lo spessore, pur non essendo omogeneo, aveva spessori inferiori ai 3 cm. Uno spunto importante potrebbe derivare dall'analisi, fatta su prototipi costruiti ad hoc, costituiti da murature varie (prototipo di muratura in mattone pieno, prototipo di muratura in mattone semipieno o forato, prototipo di muratura in blocchi tipo Porotherm, prototipo di muratura in sasso o roccia tagliata) rivestiti di intonaci di spessori differenti (da 1,50 a 4,00 cm) e rilevati mediante termocamera, da varie distanze.



Si ricorda che, con piccoli accorgimenti, è possibile agevolare le operazioni di rilievo dell'emissività e delle temperature.

In particolare si è rilevato che, utilizzando la procedura di cui al capitolo, ovvero provvedendo, in caso di equilibrio termico, al riscaldamento della parete, è possibile verificare la presenza e la consistenza di elementi murari al di sotto dell'intonaco e per un certo spessore. Infatti si sono potuti riscontrare le differenti orditure della metà muratura esterna rispetto alla metà muratura interna eseguendo in sequenza le fasi di riscaldamento e rilievo.

È stato possibile individuare le tipologie e ricostruirne l'orditura rilevando la parete con termocamera posta all'esterno, previo riscaldamento della parete stessa dall'interno del locale, e rilevando successivamente dall'esterno previo riscaldamento locale, la muratura dall'esterno e rilevando con termocamera.

Pertanto si ritiene ragionevole pensare di creare una professionalità specializzata in questo tipo di rilievo e nella conseguente restituzione qualitativa e quantitativa del dato.

Si potrà affiancare a questa nuova figura l'operazione tradizionale che, mediante l'acquisto della tecnologia qui descritta, potrà, con la strumentazione già presente nel suo studio (macchina fotografica digitale di tipo semi-professionale e termocamera di costo medio, dotata o meno di fotocamera integrata), provvedere ad effettuare rilievi termici integrandoli al tradizionale rilievo architettonico geometrico.

## **BIBLIOGRAFIA**

Lungi dal poter essere esaustiva, la bibliografia sottostante riporta le principali fonti di informazioni che sono state utilizzate. In particolare si è preferito inserire le pubblicazioni degli studi (QUIRT, ASITA etc.) nella sezione “Internet e pubblicazioni” al fine di agevolare il reperimento dei testi, pur pubblicati su riviste specialistiche e scientifiche di settore.

### **Libri e testi**

- 1) G.Bitelli, Tini M.A., Vittuari L. “Close range photogrammetry and machine vision” Wittless pubbl. 2001
- 2) Di John A. Richards “Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction” Maggioli ed.
- 3) Tecniche digitali per il rilievo, la modellazione tridimensionale e la rappresentazione nel campo dei beni culturali Valentina Alena <1976> Girelli
- 4) DOI: Girelli, Valentina Alena (2007) Tecniche digitali per il rilievo, la modellazione tridimensionale e la rappresentazione nel campo dei beni culturali
- 5) Bezoari Monti Selvini “Misura e rappresentazione” Casa Editrice Ambrosiana
- 6) CAMPANELLA “Chimica per l'arte” ED. Zanichelli
- 7) L.Bertolini “materiali da Costruzione – Il vol. degrado diagnosi restauro” ed. CittàStudi
- 8) Costantino Capra “Geomatica” Mandese Ed.

### **Internet e pubblicazioni**

<http://geomatica.unipv.it/autec/Bitelli%20-%20Moderne%20tecniche%20e%20strumentazioni%20per%20il%20rilievo%20dei%20Beni%20Culturali.pdf>

[http://www.researchgate.net/publication/46091101\\_Tecniche\\_digitali\\_per\\_il\\_rilievo\\_la\\_modellazione\\_tridimensionale\\_e\\_la\\_rappresentazione\\_nel\\_campo\\_dei\\_beni\\_culturali](http://www.researchgate.net/publication/46091101_Tecniche_digitali_per_il_rilievo_la_modellazione_tridimensionale_e_la_rappresentazione_nel_campo_dei_beni_culturali)

<http://www.universitaeuropadiroma.it/archive/images/stories/storia12/03Casagrande.pdf>

[http://www.iuav.it/Ateneo1/docenti/architetto/docenti-st/Carbonari-/materiali-1/cla-03-04-/13\\_cap.pdf](http://www.iuav.it/Ateneo1/docenti/architetto/docenti-st/Carbonari-/materiali-1/cla-03-04-/13_cap.pdf)

<http://www.optris.com/technical-article-infrared-cameras>

<http://fieldguides.gsapubs.org/content/3/17.full>

<http://www.nicta.com.au/pub?doc=1285>

<http://adsabs.harvard.edu/abs/2012InPhT..55..421G>

<http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-5-W1/197/2013/isprsarchives-XL-5-W1-197-2013.pdf>

[http://www.pf.bv.tum.de/pub/2009/hoegner\\_stilla\\_jurse09\\_pap.pdf](http://www.pf.bv.tum.de/pub/2009/hoegner_stilla_jurse09_pap.pdf)

<http://cisbat.epfl.ch/abstracts.php>

<http://testo-irsoft-software.software.informer.com/versions/>

<http://testo-irsoft-software.software.informer.com/3.1/download/>

<http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2012/papers/QIRT-2012-179.pdf>

<http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2012/papers/QIRT-2012-238.pdf>

<http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2012/papers/QIRT-2012-263.pdf>

<http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2012/papers/QIRT-2012-184.pdf>

<http://qirt.gel.ulaval.ca/archives/qirt2012/papers/QIRT-2012-296.pdf>

<http://qirt.gel.ulaval.ca/dynamique/index.php?idD=50> )

[http://www.academia.edu/380543/Integrazione tra camera ToF e tecnica fotogrammetrica multi-immagine per il rilievo metrico](http://www.academia.edu/380543/Integrazione_tra_camera_ToF_e_tecnica_fotogrammetrica_multi-immagine_per_il_rilievo_metrico)

<http://www.icvbc.cnr.it/didattica/Istituto%20Salvemini/riminesi.pdf>

<http://www.associazionetermografia.it/applicazioni/restauro.html>

[http://www.mazzacanemurolo.it/files/Termografia Applicazioni\\_13.pdf](http://www.mazzacanemurolo.it/files/Termografia_Applicazioni_13.pdf)

[http://www.fe.infn.it/~ciullo/Termologia/tesi\\_Turati\\_G\\_ottobre\\_2007.pdf](http://www.fe.infn.it/~ciullo/Termologia/tesi_Turati_G_ottobre_2007.pdf)

<http://webusers.fis.uniroma3.it/liquidsgroup/didattica/disparte.pdf>

[“Fotogrammetria numerica ed elaborazioni di immagini per produzione di cartografia tematica forestale” di Alfonso Tortora](#)

[http://www.ricercasit.it/public/documenti/Dottorato/Formazione%20interna%20dottorandi/Telerilevamento%20-%20Sensori%20e%20piattaforme%20-%20Silvia%20dalla%20Costa/Presentazione\\_tlr\\_VE.pdf](http://www.ricercasit.it/public/documenti/Dottorato/Formazione%20interna%20dottorandi/Telerilevamento%20-%20Sensori%20e%20piattaforme%20-%20Silvia%20dalla%20Costa/Presentazione_tlr_VE.pdf)

[http://www.fe.infn.it/~ciullo/Termologia/Termologia\\_08\\_2009\\_2010\\_2pg.pdf](http://www.fe.infn.it/~ciullo/Termologia/Termologia_08_2009_2010_2pg.pdf)

<http://www.bo.infn.it/~rossim/presentazioni/ONDE%20E.M.%20%20PRESENTAZIONE%20FINALE9.pdf>

[http://soi.cnr.it/archcalc/indice/PDF22/AC\\_22\\_Russo\\_et\\_al.pdf](http://soi.cnr.it/archcalc/indice/PDF22/AC_22_Russo_et_al.pdf)

<http://www.br3nn0s.org/scienza/esp2/2/ESP02.htm>

GRAZIE