

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
- Sede di Forlì -

CORSO DI LAUREA
IN INGEGNERIA AEROSPAZIALE
Classe: 10

ELABORATO FINALE DI LAUREA IN
Costruzioni aeronautiche L

**Sperimentazione di metodologie innovative di
indagine termografica in campo industriale**

CANDIDATO
Giorgio De Rosa

RELATORE
Ing. **Sara Bagassi**
CORRELATORI
Ing. **Francesca Lucchi**
Prof.re **Leonardo Seccia**

Anno Accademico 2012/2013
Sessione III

RINGRAZIAMENTI

In primo luogo desidero ringraziare la Professoressa Sara Bagassi, relatore di questa tesi, per la cortesia e la disponibilità dimostratemi e per i preziosi consigli forniti durante la stesura dell'elaborato. Un sentito ringraziamento, inoltre, va alla preziosa Professoressa Francesca Lucchi e al Professore Leonardo Seccia, correlatori di questo lavoro, per l'aiuto nella ricerca delle fonti bibliografiche, per la revisione di tutte le parti della tesi e per tutto il materiale che mi hanno dato l'opportunità di consultare. Ulteriore ringraziamento va all'Ing. Nicola Masotti senza il cui prezioso aiuto, presenza e gentilezza non sarei riuscito ad ultimare questo lavoro.

Inevitabile non menzionare i miei genitori, Mamma Giannina e Papà Giuliano, e mia sorella Gisella; in tutti questi anni, lunghi anni, non avete mai dubitato di me, delle mie potenzialità e della mia voglia di arrivare a questo traguardo. Non posso far altro che ringraziarvi e dedicarvi tutto il mio "sudore". Grazie Papone per avermi spronato a dare il meglio sempre e comunque, ad andare avanti ancora e ancora, abbattendo tutti i muri che mi si presentavano davanti, rispettando, in ogni caso, chiunque. Un grazie immenso a Mamma Gianna, senza i tuoi consigli di vita e medici, non sarei il "cavallaro" in grado di cavarsela un pò in tutte le situazioni. Grazie mille per le ore di "consulenze" so che sembra mi scocchi parlare al telefono, ma ne avrò sempre un bisogno disperato. Girellona a te un "semplice", ma importantissimo, Grazie per essermi sempre stata accanto e aver vissuto insieme a me questa Splendida Famiglia. Questa tesi è per voi.

In questi anni lunghi e tortuosi ho incontrato tante, ma tante persone che hanno contribuito a farmi arrivare fino a qui, nel bene e nel male, quindi scusate se dimenticherò qualcuno. Un ringraziamento particolare a Veronica che con me sta dividendo ogni istante; sei riuscita a sopportarmi e sostenermi anche in questo periodo ricco di stress, Grazie Tesoro! Le Zie indimenticabili Elvira, Iuna, e Anna grazie a voi e a tutta la famiglia per il sostegno impareggiabile.

Ed ora tocca a voi! Per tutti voi Amici miei Grazie! Grazie a Giovanni, coinquilino e amico unico e inseparabile, è stato bello condividere assieme tante tante e tante esperienze; Grazie a Andrea per allietarci ogni giorno con la tua presenza. Un Grazie infinito alla crew di Wastaroli: Stefano, Gianluca, Valerio,

Enrico, Giacomo, Michele, Cesare, Simone, Sara, Carlo, Carmine, Claudio, Paolo, Daniela e tutti gli altri, siete troppi per elencarvi tutti; sappiate che sarei perso senza voi. Grazie a Vittorio che oltre a condividere con me il lungo percorso universitario, è stato ed è un eccellente amico. Grazie a Jakopo, Luis, Carmelo, Marco, Michele e tutti gli amici Forlivesi e Bolognesi che hanno reso meno grigia la mia permanenza a Forlì in questi anni.

Nicola (Gino) tutto ciò è possibile anche grazie a Te. Hai visto?! Alla fine ce l'ho fatta! Sarai sempre parte di me. Grazie con tutto il cuore!

Spero di essermi ricordato di tutti; se non fosse così, non era mia intenzione tralasciare alcuno.

Grazie mille, ancora, a tutti.

Giorgio De Rosa

INDICE

| | |
|---|-----------|
| INTRODUZIONE | 1 |
| 1 INDAGINI NON DISTRUTTIVE E TERMOGRAFIA | 3 |
| 1.1 Che cos'è la termografia? | 4 |
| 1.2 EVOLUZIONE STORICA DELL'INFRAROSSO (IR) | 8 |
| 1.3 TEORIA DELLA TERMOGRAFIA | 14 |
| 1.3.1 LA TRASMISSIONE DI CALORE | 17 |
| 1.3.2 EMETTITORI DIVERSI DAI CORPI NERI | 19 |
| 2 LA TERMOCAMERA | 23 |
| 2.1 PARAMETRI FONDAMENTALI | 27 |
| 2.2 TERMOCAMERA TESTO | 29 |
| 2.3 CALCOLO DELLA TEMPERATURA | 31 |
| 2.4 IMPOSTAZIONE DEI PARAMETRI FONDAMENTALI | 34 |
| 3 LA TERMOGRAFIA ATTIVA E LE TECNICHE INNOVATIVE | 37 |
| 3.1 DIFFERENTI TECNICHE DI TERMOGRAFIA ATTIVA | 37 |
| 3.2 TECNICHE INNOVATIVE | 41 |
| 3.3 OTTIMIZZAZIONE DELLA TECNICA DI SUPER- RISOLUZIONE | 44 |
| 4 PROVE SPERIMENTALI | 51 |
| 4.1 PROVE DIMOSTRATIVE A DISTANZA RAVVICINATA | 57 |
| 4.2 ANALISI DEI RISULTATI | 64 |
| 5 CONCLUSIONI | 75 |
| BIBLIOGRAFIA | 77 |
| REFERENCES FIGURE | 79 |
| APPENDICE | 83 |

INTRODUZIONE

Nel seguente lavoro di tesi è stata realizzata la sperimentazione di alcune metodologie di indagine termografica in campo industriale. La termografia, negli ultimi anni, è emersa come metodo d'indagine ampiamente utilizzato nei test diagnostici non distruttivi, in quanto risulta una tecnica d'indagine completamente non invasiva, ripetibile nel tempo e applicabile in diversi settori: meccanico, aeronautico, siderurgico, elettronico, medico, ambientale, veterinario, agricolo, etc.

Attraverso la termografia è possibile individuare difetti superficiali e sub – superficiali, o possibili anomalie, mediante la rappresentazione della distribuzione superficiale di temperatura dell'oggetto o dell'impianto indagato. Tale rappresentazione avviene mediante la misurazione dell'intensità di radiazione infrarossa emessa da un qualsiasi corpo caratterizzato da una temperatura superiore allo “zero assoluto” (0 K, -273 °C). La misura della radiazione infrarossa è ottenuta grazie all'ausilio di una termocamera. Tramite questo strumento è possibile ottenere una “mappa” della temperatura superficiale, in scala di grigio o falsi colori, utile per valutare lo stato dell'oggetto indagato: una distribuzione non uniforme della temperatura superficiale è sintomo della presenza di difetti.

Considerate la continua evoluzione di tale metodologia d'ispezione termica e la necessità, sempre maggiore, di ottenere immagini a elevata risoluzione, negli ultimi tempi sono state implementate (nell'ambito dell'elaborazione delle immagini mediante software) tecnologie innovative in grado di garantire un miglioramento della risoluzione finale dell'immagine termica. Tali miglioramenti sono ottenuti senza agire direttamente sull'*hardware* dell'apparecchiatura in dotazione (sensore della termocamera). L'obiettivo di questo lavoro di tesi è quello di effettuare una sistematica campagna sperimentale di rilevamenti termici, volta a stabilire i miglioramenti introdotti da queste nuove tecniche, valutando un caso di studio di tipo industriale.

L'elaborato presenta una prima parte introduttiva alla termografia che ne illustra i principi fisici, riportando alcuni esempi di analisi di possibile interesse e realizzazione.

INTRODUZIONE

Successivamente vengono presentati i fondamenti delle tecniche innovative sopra menzionate, mostrando le loro principali caratteristiche.

Le verifiche sperimentali sono state eseguite presso il Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale dell'Università di Bologna. Durante le prove è stato individuato un componente industriale di maggiore interesse tra le diverse opzioni proposte e si è provveduto, successivamente, ad acquisire le immagini termiche relative alle diverse casistiche da analizzare in questo lavoro. Attraverso l'elaborazione delle immagini mediante *software*, si è effettuato un confronto tra gli scatti registrati, per riuscire a individuare e apprezzare le eventuali differenze tra le diverse modalità di acquisizione adottate.

I risultati ottenuti dalla sperimentazione delle tecniche di indagine termografica oggetto della tesi sono analizzati nel capitolo quarto e mostrano i vantaggi introdotti dall'utilizzo di tecniche di super-risoluzione nelle indagini termografiche di componenti industriali. L'analisi dei risultati mostra inoltre come l'utilizzo dei dispositivi di acquisizione termografica in modalità super-resolution sia possibile anche su cavalletto.

1 INDAGINI NON DISTRUTTIVE E TERMOGRAFIA

In campo industriale ed architettonico spesso si rende necessario svolgere dei lavori di accertamento e manutenzione di parti di impianto, di elementi strutturali, di rivestimenti etc.; durante tali ispezioni viene redatto un progetto diagnostico che determina le linee guida e le metodologie da seguire. Le possibilità nella scelta dei tipi di accertamenti da adottare sono:

- **Metodologia distruttiva** (o anche “*lesiva*”): permette di quantificare alcuni aspetti di degrado praticando dei saggi nell’integrità della struttura.
- **Metodologia non distruttiva**: non va ad intaccare in nessun modo l’oggetto o la struttura indagata.

I metodi non distruttivi presentano diversi vantaggi rispetto a quelli distruttivi: maggiore precisione e quantità di informazioni fornite, maggiore velocità di acquisizione e di elaborazione dati e soprattutto una ripetibilità della misura.

Nell’ambito di questo lavoro ci soffermeremo pertanto sulle **metodologie diagnostiche non distruttive**.

Tali tecniche si possono distinguere in:

- **Metodologie non distruttive passive**: le misurazioni sono basate su quei fenomeni fisici che si verificano naturalmente, rilevati senza necessità di alcuna sollecitazione esterna;
- **Metodologie non distruttive attive**: richiedono un’eccitazione di tipo artificiale, di varia natura (es.: eccitazione termica mediante lampade, sorgente ad ultrasuoni, mediante vibrazioni meccaniche), permettendo così agli strumenti in uso di rilevare differenze di stato dell’oggetto in considerazione.

La **termografia all’infrarosso** (*Infrared Thermography* - **IR**) è una tecnica di indagine che rileva sia in modalità passiva che attiva. La parola stessa “*termografia*” significa rappresentazione grafica (*grafia*) della temperatura (*termo*) superficiale di un oggetto. Può essere utilizzata in un qualsiasi processo (industriale, edilizio, medico, ambientale) in cui vi sia un cambiamento di temperatura o in un qualunque sistema caratterizzato da scambi di calore.

Attraverso la termografia si riesce ad ottenere una rappresentazione della distribuzione superficiale di temperatura del corpo esaminato, mediante la misurazione dell'intensità di radiazione infrarossa emessa. Ad oggi, inoltre, esistono altre tecniche non distruttive che sfruttano la fisica delle particelle. Tra quelle ormai note e di utilità quotidiana, troviamo:

- *Gammagrafia;*
- *Radiografia;*
- *Registrazione del rallentamento dei neutroni.*

La misurazione ottenuta mediante le tecniche d'indagine non distruttiva sarà tanto più accurata, quanto maggiore è l'adeguatezza della scelta di attrezzature e metodologie d'intervento. Quindi, le scelte dell'operatore influiranno notevolmente sul risultato della prova. Negli ultimi anni, la termografia a infrarossi è emersa come metodo ampiamente utilizzato per test non distruttivi, in quanto permette di rilevare, senza contatto, difetti superficiali o sub-superficiali su un'ampia area di ispezione, e può essere utilizzata come alternativa o complemento alle tecnologie di controllo normalmente utilizzate.

1.1 *Che cos'è la termografia?*

La percezione della temperatura è per noi un fenomeno normalissimo con cui siamo abituati da sempre a convivere. Questo perché siamo immersi in un ambiente con continui scambi termici, ed essendo parte di esso, spesso non ci accorgiamo come tali fenomeni siano una componente fondamentale della nostra vita. Le misure termiche ci circondano assieme ai sistemi di misurazione. Alcuni esempi possono essere: il termometro per misurare la nostra temperatura interna, il termostato di casa, i termostati stradali per indicare la temperatura esterna, i sensori termici per rilevare il surriscaldamento dei pc, le previsioni del tempo che includono le temperature attuali e future, etc...

La termografia può essere definita come: “...una tecnica diagnostica assolutamente non distruttiva che, misurando la radiazione infrarossa emessa da un corpo, è in grado di determinarne la temperatura superficiale...” (cfr. [1] p.45) (non si misura la temperatura assoluta della superficie, bensì si avrà una mappatura della temperatura superficiale con una varianza di $\pm 2\%$ della misura).

Attraverso la termocamera¹ vengono, quindi, generate delle mappe in scala di grigio o in falsi colori, a seconda della scala impostata in sede di misura o analisi dei dati. La mappatura della temperatura superficiale (*termogramma*) è fondamentale per valutare lo stato dell'oggetto o dell'impianto in esame: diverse temperature di uno stesso materiale sono sintomo di patologie di degrado in atto.

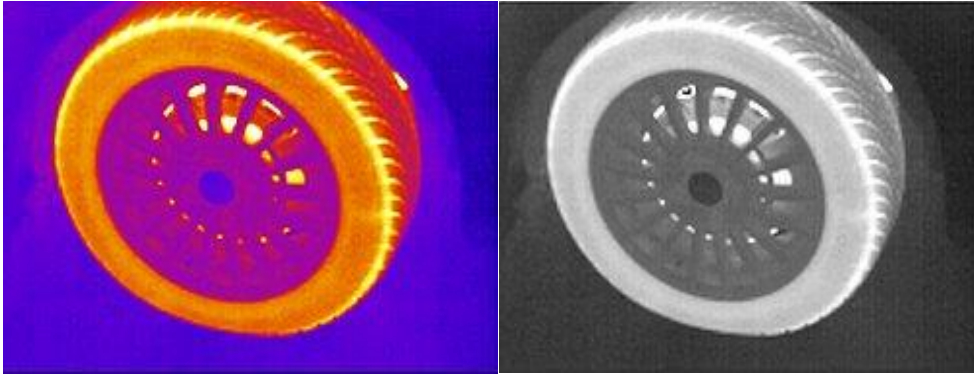


Fig.1.1 Carica termica di un pneumatico in falsi colori e in scala di grigio.

La termografia presenta una serie di vantaggi rispetto ad altre tecniche d'indagine, che possono essere così riassunti:

- Tecnica d'indagine assolutamente non invasiva, possono essere ripetute molteplici misurazioni nel tempo, sempre sullo stesso pezzo, in modo da verificare mutamenti al variare delle condizioni esterne;
- Indagine telemetrica ripresa da distanza, quindi, in grado di analizzare vaste aree in breve tempo;
- I risultati, visualizzati come immagini in scala di colori o grigi, sono relativamente facili da interpretare. Inoltre, le immagini possono essere elaborate mediante opportuni software per estrapolare ulteriori informazioni;
- Utilizzo di un unico strumento di ispezione per diversi compiti di controllo;
- Le normali attività svolte non vengono interrotte: fermo macchina o fermo impianto non sono necessari per effettuare un'indagine termografica su componenti meccanici in movimento. Saranno necessarie

¹ Termocamera: apparecchiatura utilizzata per effettuare una ripresa termografica (vedi [1] p.46), in grado, mediante un sensore, di determinare la distribuzione di temperatura superficiale dell'oggetto indagato.

eventuali schermature per evitare che pezzi o impianti, ad elevata temperatura, vicini a quello indagato, possano influenzare la misura della temperatura del pezzo di nostro interesse;

- Permette di identificare i punti critici e quindi di attuare interventi mirati;
- Favorisce il mantenimento in sicurezza ed efficienza del sistema, riducendo il rischio d'incendi, perdite, rotture, calo di prestazioni, interruzioni di servizio;
- Garantisce la sicurezza del personale poiché non sono coinvolte radiazioni nocive;
- Aumenta la redditività aziendale in termini di:
 - ❖ riduzione dei costi di ripristino impianto/macchina da incidente;
 - ❖ ottimizzazione dei costi di manutenzione;
 - ❖ minori costi assicurativi per alea² ridotta: alcune compagnie assicurative effettuano sconti sui premi applicati alle aziende qualora le stesse effettuino un'ispezione termografica.

L'indagine termografica, tuttavia, è caratterizzata dai seguenti svantaggi:

- Il termogramma è indicativo solo dello stato superficiale dell'oggetto indagato: la termocamera rileva solo la distribuzione della temperatura superficiale;
- Possibile apparizione di artefatti sub-superficiali che rappresentano modifiche della temperatura superficiale dovute all'ombra termica che altri oggetti (diversi pezzi o materiale a diversa temperatura) dietro la superficie indagata proiettano sulla superficie stessa. Ad esempio, effettuando un'indagine termografica su un quadro elettrico, senza rimuovere la placca protettiva, il termogramma mostrerà una distribuzione di temperatura superficiale caratterizzata da disturbi derivanti dalle ombre termiche, generate dalle parti del circuito (cavi, interruttori, viti, etc.) ad elevata temperatura che si trovano al di sotto della placca;
- Capacità di rilevare solo i difetti dovuti a un cambiamento misurabile delle proprietà termiche dell'oggetto indagato;

² Alea: rischio inerente qualsiasi operazione contrattuale/negoziale.

- Capacità di ispezionare un limitato spessore del materiale sotto la superficie;
- Discontinuità termiche o irregolarità sotto lo strato corticale sono visibili solo attraverso la **termografia attiva**. Per mezzo di un'indagine passiva potremo rilevare unicamente delle ombre termiche sulla superficie;
- Difficoltà nell'ottenere una rapida, uniforme ed energica stimolazione termica di un'ampia superficie;
- Le perdite di calore (**convettivo, radiativo**) inducono contrasti che incidono sulla capacità interpretativa dell'operatore;
- Le condizioni climatiche del luogo in cui si opera influiscono fortemente sul risultato della prova termografica: la temperatura, l'umidità e la velocità del vento si ripercuotono sui risultati, modificando le modalità con cui avviene lo scambio termico tra i materiali e l'ambiente circostante;
- Costo elevato delle attrezzature.

Tutti gli oggetti a temperatura superiore allo zero assoluto emettono radiazioni nel campo dell'infrarosso, indi per cui, la termografia trova oggi applicazione in numerosi settori: siderurgia, edilizia, elettronica, meccanica, medicina, veterinaria, industria chimica, beni culturali, aeronautica, protezione dell'ambiente, etc.

La termografia trova, inoltre, applicazione nel monitoraggio stradale, nella costruzione di programmi d'indagine di efficienza termica, nell'agricoltura, nella biologia e nella rilevazione di gas (per mezzo di assorbimento di gas tracciante). In tutti questi casi, profili anomali della temperatura stanno a indicare una potenziale criticità. Interessante, per alcune applicazioni, è la conoscenza del processo di fabbricazione e del regime di funzionamento del pezzo esaminato, in quanto, combinati con una corretta modellazione termica superficiale rendono possibile dedurre informazioni aggiuntive quantitative come lo spessore residuo di materiali refrattari. Nella termografia attiva in funzione della stimolazione esterna, sono stati sviluppati diversi approcci, come ad esempio: **termografia ad impulso** (*Pulsed Thermography*), **riscaldamento a gradini** (*Step Heating*), **termografia lock-in** (*Lock-in Thermography*), **termografia con fase pulsata** (*Pulsed Phased Thermography*), **vibro-termografia** (*Vibro Thermography*). L'approccio attivo

trova numerose applicazioni nelle indagini non distruttive in quanto riesce a mostrare difetti sub-corticali, che altrimenti non verrebbero rilevati.

La termografia può anche essere implementata seguendo uno schema di contatto, ad esempio mediante l'utilizzo di termometri a contatto, o termocoppie, in modo tale da poter avere termini di confronto.

1.2 EVOLUZIONE STORICA DELL'INFRAROSSO (IR)

Sia la luce che il calore sono due forme di energia che si propagano attraverso onde elettromagnetiche. L'insieme delle onde elettromagnetiche, caratterizzate da una **lunghezza d'onda** (λ) e dalla **frequenza** (f), può essere rappresentato attraverso lo **spettro elettromagnetico**. La lunghezza d'onda è generalmente espressa in **micrometri** (μm , $1 \mu\text{m} = 10^{-6}$ metri), anche se, nella regione dell'infrarosso, è possibile utilizzare anche altre unità di misura: **nanometri** (**nm**, $1 \text{ nm} = 10^{-9}\text{m}$) o **angstrom** (**Å**, $1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-4} \mu\text{m} = 10^{-10}\text{m}$).

La radiazione infrarossa è una frazione dello spettro elettromagnetico con lunghezza d'onda maggiore (e frequenza inferiore) rispetto a quella che caratterizza i raggi di luce visibile, ma inferiore a quella delle onde radio. Tale radiazione è un tipo di onda elettromagnetica non percepibile dall'occhio umano (non facendo parte della parte del visibile dello spettro elettromagnetico, vedi fig. 1.2), ma deducibile dal cambiamento di temperatura.

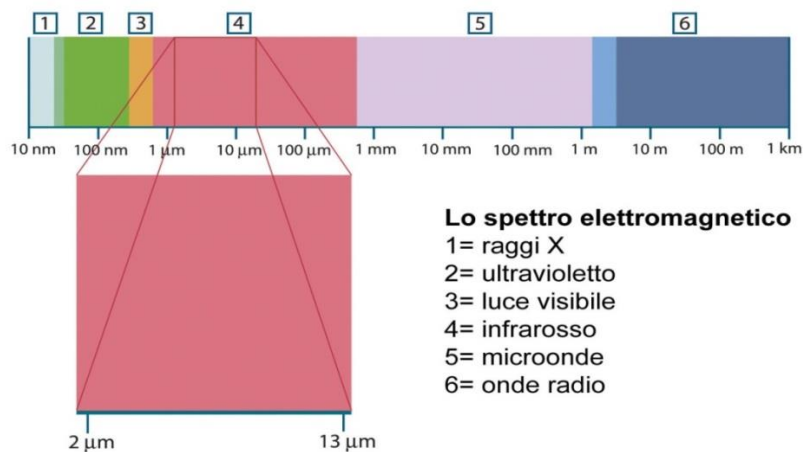


Fig. 1.2 Spettro elettromagnetico (particolare: spettro infrarosso).

Lo spettro elettromagnetico è suddiviso in un certo numero di regioni classificate in base alla lunghezza d'onda. Queste regioni sono denominate **bande** (*banda dei raggi X, banda dell'ultravioletto, banda della luce visibile, banda dell'infrarosso, etc.*). Non esiste alcuna differenza sostanziale tra le diverse bande dal punto di vista delle leggi fisiche che le governano e differiscono solo per le diverse lunghezze d'onda che le caratterizzano. Si parla d'infrarossi proprio perché la frequenza di queste onde è inferiore (infra = sotto) a quella che caratterizza il rosso³. La banda dell'infrarosso, spesso, viene ulteriormente suddivisa in bande più piccole; nella fattispecie quattro:

- **Infrarosso vicino** (0,75 – 3 μm);
- **Infrarosso medio** (3 – 6 μm);
- **Infrarosso lontano** (6 – 15 μm);
- **Infrarosso estremo** (15 – 100 μm).

La scoperta della radiazione infrarosso, fu quasi accidentale ed avvenne all'inizio del 1800 per mano di un famoso astronomo **Sir William Herschel**⁴ (1738-1822). Herschel era alla ricerca di un nuovo filtro ottico, da montare su telescopi, in grado di ridurre la luminosità durante le osservazioni del sole. Utilizzando diverse tipologie di vetri colorati si accorse che taluni filtravano quantità ridotte di calore del sole. Decise, quindi, di riprendere l'esperimento di **Newton** condotto nel 1670: scomporre la luce solare nei sette colori che ne compongono lo spettro, attraverso un prisma di vetro. A questo punto, utilizzando un termometro con bulbo annerito, si accorse che a ogni colore corrispondeva una temperatura differente. Inoltre, notò che la temperatura superiore non si raggiungeva in corrispondenza del rosso, bensì oltre questa zona. Herschel denominò questa nuova porzione dello spettro elettromagnetico come "*spettro termometrico*", e grazie a questo suo esperimento si rese inoltre conto del fatto che il vetro non era trasparente all'infrarosso e, al contrario di quello che si poteva pensare, vi era un'attenuazione, seppur minima, al passaggio di calore.

³ Rosso: colore visibile con la frequenza più bassa.

⁴ Sir William Herschel: famoso astronomo noto per la scoperta del pianeta Urano.

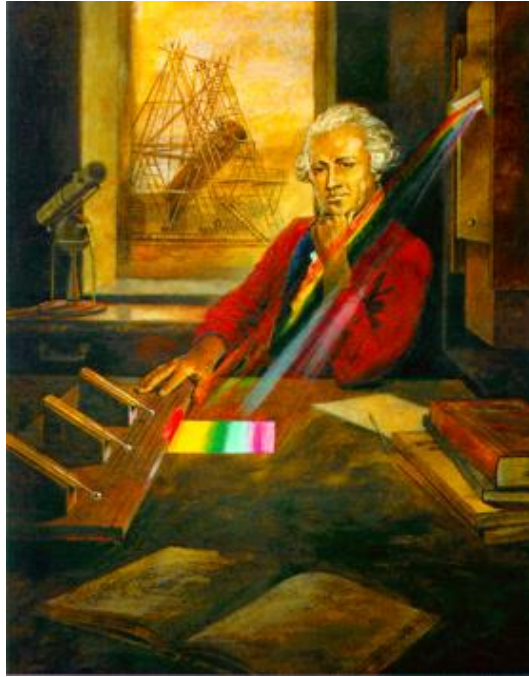


Fig. 1.3 Sir William Herschel.

Nel 1830 l'italiano **Macedonio Melloni** (1798-1854) scoprì che cristalli di salgemma sufficientemente grandi erano trasparenti alla radiazione infrarosso e, successivamente, riuscì a realizzare la prima **termopila** collegando in serie differenti **termocoppie** (rispetto ai precedenti termometri raggiungono una precisione che si avvicina al centesimo di grado) inventate qualche anno prima (1829) ad opera di **Leopoldo Nobili** (1784-1835). Attraverso la termopila (primo sistema di rilevazione di calore a distanza) Melloni fu in grado di rilevare il calore di una persona a circa tre metri di distanza.

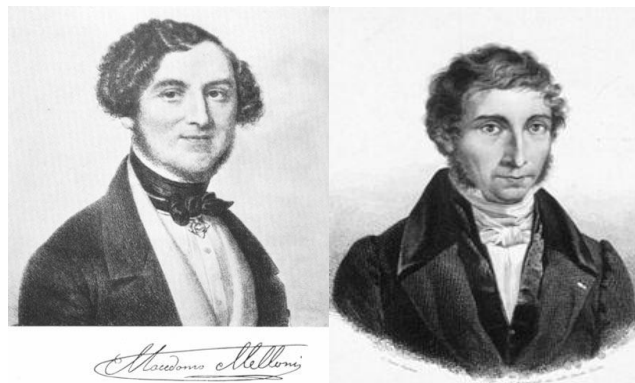


Fig. 1.4 Macedonio Melloni (a sinistra); Leopoldo Nobili (a destra).

La “*prima immagine del calore*” fu opera del figlio di Sir William Herschel, **Sir John Herschel** (1792–1871), che fu in grado di ottenere la prima vera immagine

termica, visibile solo in luce riflessa, attraverso l'evaporazione dell'olio racchiuso in una particolare pellicola. Qualche anno dopo riuscì a produrre anche la prima immagine termica su carta. A questo evento viene fatta coincidere la nascita della **termografia**.

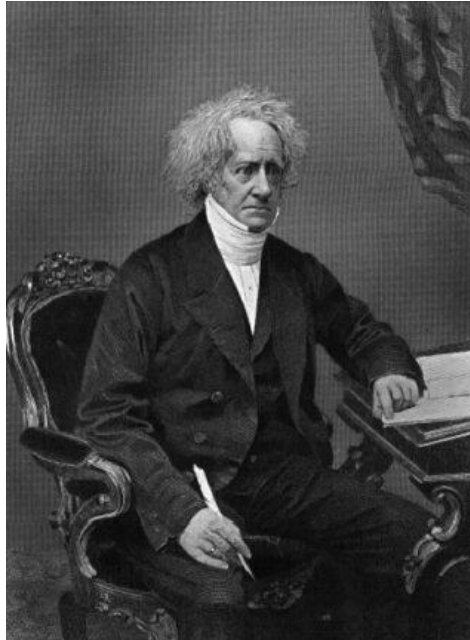


Fig. 1.5 John Frederick William Herschel.

Le moderne termocamere montano sensori la cui realizzazione parte dal “**bolometro**” (1878) invenzione di **Samuel Langley** (1834-1906).

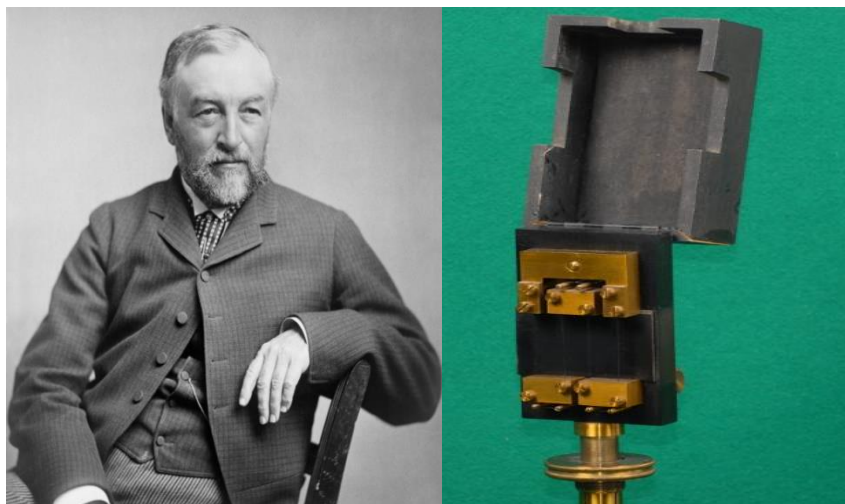


Fig. 1.6 Samuel Langley; bolometro.

Il bolometro è uno strumento molto sensibile, in grado di misurare l'energia radiante della radiazione elettromagnetica, indipendentemente dalla lunghezza

d'onda considerata. Al suo interno è posizionata una lamina sottile di metallo rivestita di nero-fumo; il tutto viene poi inserito in un circuito elettrico. Quando la lamina è esposta alla radiazione elettromagnetica, si comporta come un **corpo nero**⁵: assorbe tutta l'energia radiante, si riscalda e, conseguentemente, varia la sua resistenza elettrica. Misurando tale variazione di resistenza si risale all'energia assorbita. Nel bolometro di Langley la lamina di metallo è costituita da una sottile lamina di platino. Utilizzando tale strumento in un esperimento, Langley, riuscì a rilevare una mucca a circa quattrocento metri di distanza.

Un'altra importante invenzione che ha caratterizzato ed ha reso possibile il mercato degli apparecchi termografici è il **vaso di Dewar**⁶ (1892) inventato dall'inglese **Sir James Dewar**. Questa invenzione rappresentò una vera e propria svolta in campo termografico, in quanto, tutti gli apparecchi termografici (fino al 1997) necessitavano di un sistema di raffreddamento in grado di raffreddare il sensore in modo tale da poter misurare la radiazione infrarossa. Il sensore veniva raffreddato fino ad una temperatura di -196 °C mediante l'uso di azoto liquido contenuto, appunto, in un vaso di Dewar.

Un'importante svolta in ambito militare si ebbe intorno ai primi decenni del '900, quando furono sviluppati i primi strumenti che resero possibile la visione notturna (primi **convertitori di immagine**). Costituiti da un **illuminatore a luce infrarossa** e da un corrispondente **rilevatore**, permettevano di individuare un oggetto, un nemico o il campo di battaglia, senza la presenza di luce visibile. Questa strategia fu abbandonata poco dopo in quanto l'illuminatore all'infrarosso era facilmente individuabile dai possibili nemici, mediante l'uso del solo rilevatore. Negli anni successivi è stata sviluppata la tecnologia per strumenti privi di raggio di ricerca.

⁵ Corpo nero: vedi paragrafo successivo.

⁶ Vaso di Dewar (1892): contenitore a chiusura ermetica in grado di conservare dei gas liquefatti; odierni termos sfruttano la stessa teoria (vedi [1] p.56).



Fig. 1.7 James Dewar.

Tale tecnologia è stata protetta da brevetti militari fino agli anni '60. Successivamente, nel 1964, compaiono le prime strumentazioni a scopo civile, tutt'ora ampiamente diffuse, quali ad esempio telecamere con ricevitore e illuminatore a luce infrarossa.



Fig. 1.8 Visore notturno binoculare⁷; visione notturna con visore binoculare.



Fig. 1.9 Telecamera per videosorveglianza notturna: corona di led(illuminatore)+ ricevitore centrale.

⁷ Visore notturno binoculare: visore all'infrarosso(emettitore + ricevitore all'infrarosso).

1.3 TEORIA DELLA TERMOGRAFIA

Alla base della teoria della termografia vi sono la definizione di **corpo nero** (*black body*): “*corpo in grado di assorbire tutte le radiazioni che lo colpiscono a qualsiasi lunghezza d’onda*”, e la **legge di Kirchhoff** (**Gustav Robert Kirchhoff**, 1824-1887), la quale afferma che “*un corpo in grado assorbire tutte le radiazioni a una lunghezza d’onda qualsiasi è ugualmente in grado di emettere radiazioni*”. La costruzione di una sorgente di radiazione di un corpo nero è in linea di principio abbastanza semplice: si pensi ad una scatola nascosta alla luce (perfettamente chiusa) ad eccezione di un piccolo foro praticato su uno dei lati. Qualsiasi radiazione che entri all’interno del foro viene assorbita e diffusa attraverso diverse **riflessioni**, in modo che solo una parte infinitesima della radiazione possa uscire. Se la cavità è riscaldata uniformemente e in maniera adeguata, questa diventa un **radiatore a cavità**, generando così la radiazione di un corpo nero, le cui caratteristiche sono stabilite in relazione alla temperatura della cavità stessa. Tali radiatori sono utilizzati per la **calibrazione** degli strumenti termografici nelle prove di laboratorio; servendosi come sorgenti di radiazioni standard (rappresentano un riferimento di temperatura). Se la temperatura del corpo nero aumenta fino a un valore maggiore o uguale a 525 °C la sorgente comincia ad entrare nella banda spettrale del visibile e, quindi, non risulta più essere nera. Possiamo, quindi, definire la **temperatura di colore** di un oggetto come la temperatura che un corpo nero dovrebbe avere per essere come l’oggetto considerato. La radiazione emessa da un corpo nero è descritta attraverso tre espressioni:

1. **Legge di Planck;**
2. **Legge di spostamento di Wien;**
3. **Legge di Stefan-Boltzmann.**

La prima, la legge di Plack (**Max Planck** 1858-1947) descrive la **distribuzione spettrale della radiazione emessa da un corpo nero**:

$$W_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \times 10^{-6} \text{ [Watt / m}^2, \mu\text{m]} \text{ (legge di Planck) ([1, 2, 3])}$$

| $W_{\lambda b}$ | Emittanza spettrale energetica del corpo nero alla lunghezza d'onda λ |
|-----------------------------|---|
| c | Velocità della luce = 3×10^8 m/s |
| h | Costante di Planck = $6,6 \times 10^{-34}$ Joule sec |
| k | Costante di Boltzmann = $1,4 \times 10^{-23}$ Joule / Kelvin |
| T | Temperatura assoluta (Kelvin) di un corpo nero |
| Λ | Lunghezze d'onda μm |

indice b= *black body*

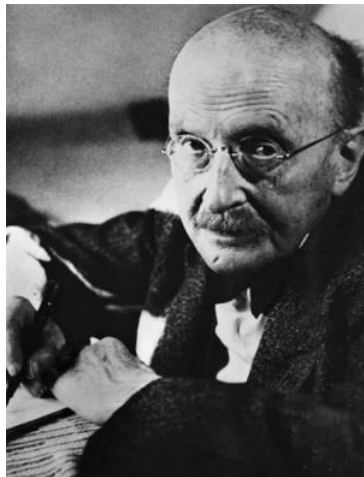


Fig. 1.10 Max Planck.

Tale legge, rappresentata graficamente a diverse temperature, genera una famiglia di curve (Fig.1.11), per ognuna delle quali vale:

per $\lambda=0$ l'emittanza spettrale è zero, poi cresce rapidamente fino ad arrivare al massimo pari a λ_{max} e, dopo averlo raggiunto, decresce nuovamente avvicinandosi fino a valori prossimi allo zero per valori elevati della lunghezza d'onda.

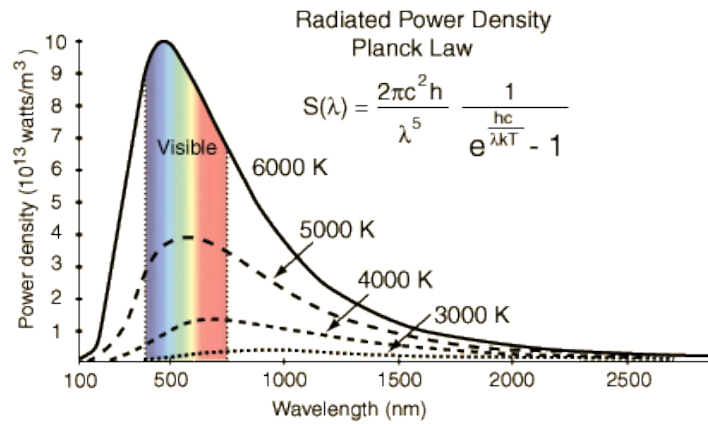


Fig. 1.11 Rappresentazione grafica legge di Planck (y=emittanza energetica spettrale, x=lunghezza d'onda).

Differenziando la formula di Planck rispetto a λ e identificando il massimo (λ_{max}) otteniamo:

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} [\mu m] ([1, 2, 4]).$$

Nota come **formula di Wien (Wilhelm Wien 1864-1928)**, la relazione rappresenta matematicamente il fenomeno in base al quale i colori variano dal rosso al giallo con l'aumentare della temperatura. La lunghezza d'onda del colore considerato sarà pari a λ_{max} ; una buona approssimazione per tale valore, prendendo in considerazione una determinata temperatura del corpo nero, si ottiene applicando la formula approssimata $3000/T[\mu m]$.



Fig. 1.12 Wilhelm Wien.

Integrando la formula di Planck tra gli estremi $\lambda=0$ a $\lambda=\infty$, otteniamo l'**emittanza radiante totale (W_b)**:

$$W_b = \sigma T^4 \text{ [Watt / m}^2\text{]} \text{ (legge di Stefan-Boltzmann) ([1, 2, 4]),}$$

dalla quale si evince che la quantità totale di energia emessa da un corpo nero (W_b) è direttamente proporzionale alla temperatura elevata alla quarta ed identifica l'area sottesa dalla curva di Planck relativa alla temperatura considerata.



Fig. 1.13 Josef Stefan(1835-1893) sinistra; Ludwig Boltzmann (1844-1906) destra.

1.3.1 LA TRASMISSIONE DI CALORE

La trasmissione di calore tra due corpi avviene spontaneamente quando si ha una differenza di temperatura tra loro, con passaggio di calore dall'oggetto più caldo a quello più freddo fino al raggiungimento di un equilibrio termico tra i due, come asserisce il secondo principio della termodinamica: *“l'entropia di un sistema isolato lontano dall'equilibrio termico tende a salire nel tempo, finché l'equilibrio non è raggiunto”*. Il corpo caldo trasmette a quello freddo parte della sua energia termica aumentandone l'agitazione molecolare: la differenza di temperatura tra i due corpi rappresenta la causa del trasferimento di calore.

Il calore si propaga mediante tre diverse modalità:

- Conduzione;
- Convezione;
- Irraggiamento.

CONDUZIONE

La conduzione⁸ avviene quando due corpi a differenti temperature si trovano a contatto diretto; il corpo più caldo riscalda il corpo più freddo mediante cessione di parte della propria energia termica. L'energia termica del corpo più caldo, che a livello microscopico s'identifica in energia cinetica vibrazionale molecolare, è trasmessa al corpo a più freddo con una velocità direttamente proporzionale alla **conducibilità termica del materiale (k)**⁹. Quindi l'energia trasmessa per conduzione da un corpo più caldo a uno più freddo, potrà essere calcolata mediante la **legge di Fourier**:

$$q = \left(\frac{k}{s}\right) A(T_1 - T_2) \quad ([1])$$

| q | Energia trasmessa [W] |
|----------------------|--|
| k | Conducibilità termica del materiale in cui avviene il passaggio di calore [W/mK] |
| s | Spessore della sezione attraversata dal calore [m] |
| A | Area della sezione considerata [m ²] |
| T₁ | Temperatura del corpo più caldo [K o °C] |
| T₂ | Temperatura del corpo più freddo [K o °C] |

CONVEZIONE

Può essere definita come una particolare modalità di conduzione: il corpo caldo riscalda quello più freddo, senza che vi sia alcun tipo di contatto diretto tra i due corpi, ma grazie alla presenza di un “**fluido termovettore**”¹⁰ che si riscalda per conduzione a contatto con il corpo caldo e, successivamente, cede calore quando viene a contatto con il corpo più freddo.

⁸ Conduzione: avviene a livello microscopico; non si ha un passaggio di particelle costituenti il materiale a carattere macroscopico.

⁹ Conducibilità termica (k): rapporto tra il flusso di calore e il gradiente della temperatura (∇T)

¹⁰ Fluido termovettore: fluido intermedio tra i due materiali (aria considerata fluido) che si riscalda e cede calore.

Questo secondo tipo di trasmissione di calore è descritto dalla **legge di Newton**:

$$q_c = h A_s (T_1 - T_f) \quad ([1])$$

| | |
|-------|---|
| q_c | Calore ceduto per convezione [W] |
| A_s | Area della superficie del corpo più caldo [m ²] |
| h | Coefficiente di convezione termica ¹¹ [W/m ² K] |
| T_1 | Temperatura della superficie del corpo più caldo [K o °C] |
| T_f | Temperatura del fluido termovettore [K o °C] |

IRRAGGIAMENTO

L'irraggiamento consiste in un meccanismo completamente indipendente da qualsiasi forma di contatto, anche quello legato alla presenza di un fluido termovettore (può avvenire anche nel vuoto). Il passaggio di calore avviene mediante emissione e assorbimento di radiazioni elettromagnetiche da parte dei corpi in esame. Come già sottolineato, qualsiasi corpo a temperatura superiore allo zero assoluto (0 K o -273.15 °C) emette radiazioni elettromagnetiche. L'emissione dipende dell'agitazione molecolare delle particelle che costituiscono il corpo esaminato. Avremo inoltre una dipendenza diretta tra emissione di radiazioni, agitazione molecolare e temperatura: maggiore è l'energia cinetica molecolare, maggiore sarà la temperatura e, di conseguenza, maggiore sarà l'emissione di radiazioni.

1.3.2 EMETTITORI DIVERSI DAI CORPI NERI

Gli oggetti reali non si comportano come corpi neri e, quindi, non rispettano quasi mai le leggi sopra illustrate, anche se, alcuni, in casi specifici si possono comportare in maniera simile. I fenomeni che inducono un oggetto reale a non comportarsi come un corpo nero sono tre: una parte (α) della radiazione incidente sarà **assorbita**, un'altra frazione (ρ) sarà invece **riflessa** e la restante parte (τ) verrà **trasmessa**, cioè attraversa il corpo (legge di Kirchhoff).

¹¹ Coefficiente di convezione termica (h): o coefficiente di scambio termico, pari al rapporto tra il flusso di calore (q) e il prodotto tra la superficie di scambio termico e la differenza di temperatura (A*ΔT).

Si definiscono quindi:

- **Coefficiente di assorbimento spettrale** α_λ = rapporto tra flusso energetico spettrale assorbito e quello incidente;
- **Coefficiente di riflessione spettrale** ρ_λ = rapporto tra flusso energetico spettrale riflesso e quello incidente;
- **Coefficiente di trasmissione spettrale** τ_λ = rapporto tra flusso energetico spettrale trasmesso e quello incidente.

La loro somma è sempre unitaria $\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1$; per **materiali opachi** $\tau_\lambda = 0$, quindi si semplifica in $\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1$ (vedi [2,10]).

Altro fattore importante, denominato **emissività** ε , è pari al rapporto tra il flusso emesso da un oggetto e quello emesso da un corpo nero alla stessa temperatura e lunghezza d'onda; tale fattore descrive la frazione ε dell'emittanza radiante di un corpo nero prodotta da un oggetto reale a una data temperatura e ci permette di definire il coefficiente:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{W_{\lambda o}}{W_{\lambda b}} \text{ (emissività spettrale) ([1, 2])}$$

In generale possiamo distinguere tre tipi di sorgenti di radiazione:

1. **Corpo nero** $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = 1$;
2. **Corpo grigio** $\varepsilon_\lambda = \varepsilon =$ costante inferiore a 1;
3. **Radiatore selettivo** per cui ε varia in base alla lunghezza d'onda.

Comunque per un qualsiasi materiale, secondo la legge di Kirchhoff, avremo che l'emissività è pari all'assorbimento, quindi: $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$ per qualsiasi temperatura e lunghezza d'onda. Di conseguenza per un **corpo opaco**, poiché $\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1$, otteniamo $\varepsilon_\lambda + \rho_\lambda = 1$. Per **materiali** estremamente **lucidi** ε_λ tende a zero ($\varepsilon_\lambda \rightarrow 0$), mentre per **materiali** perfettamente **riflettenti** avremo $\varepsilon_\lambda = 0$ e quindi $\rho_\lambda = 1$ (es.: specchio) [2,10].

La legge di Stefan-Boltzmann per un corpo nero ($W_b = \sigma T^4$) diventa, invece, per un corpo grigio:

$$W = \varepsilon \sigma T^4 \text{ [Watt / m}^2\text{] ([1, 2, 4])}$$

Si può facilmente osservare come il potere emissivo totale di un corpo grigio sia uguale a quello di un corpo nero alla stessa temperatura moltiplicato per il valore dell'emissività ε del corpo grigio (costante inferiore a uno).

Esistono, inoltre, materiali non metallici che risultano essere semitrasparenti agli infrarossi, come ad esempio una spessa lastra di plastica. Per questo tipo di materiale avremo un'emissività effettiva è pari a:

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{(1-\rho_{\lambda})(1-\tau_{\lambda})}{1-(\rho_{\lambda}\tau_{\lambda})} ([1, 2]),$$

mentre quando la lastra è opaca:

$$\varepsilon_{\lambda} = 1 - \rho_{\lambda} ([1, 2]).$$

2 LA TERMOCAMERA

Le termocamere presenti oggi sul mercato si differenziano in due grandi gruppi:

- **Termocamere raffreddate;**
- **Termocamere non raffreddate.**

Le termocamere non raffreddate (in commercio solo dal 1997) rappresentano oggi circa il 90% di quelle in commercio. Ciò è legato soprattutto ai costi ridotti e alle dimensioni più contenute. Tali ragioni hanno reso possibile la grande espansione della termografia come metodologia diagnostica, anche se, le termocamere raffreddate rappresentano ancora oggi la scelta migliore per l'alta precisione.

La termocamera, in generale, è un'apparecchiatura che può essere pensata costituita da:

- **Sensore;**
- **Sistema di scansione;**
- **Obiettivo (o ottica).**

SENSORE

Essenzialmente esistono due tipologie di sensori: i **foto-rilevatori** (o **sensori a quanti**) e i **termo-rilevatori** (o **sensori termici**).

- ◆ **Sensori a quanti:** operano in base all'effetto fotoelettrico, costituiti da materiali semiconduttori in grado di assorbire fotoni e di trasformarli in corrente elettrica. Tempi di risposta molto rapidi;
- ◆ **Sensori termici:** più economici, presentano una buona risposta su tutta la lunghezza d'onda dello spettro, sono costituiti da materiali metallici o semiconduttori. Assorbono l'energia irraggiata dall'oggetto e misurano la variazione della temperatura in relazione alla variazione delle proprietà elettriche. Elevato tempo di risposta. I termo-rilevatori più comuni sono rappresentati da termocoppie e bolometri.

Le termocamere raffreddate sono dotate di sensori foto-rilevatori "miniaturizzati", la cui efficacia dipende dal tipo di materiale impiegato per la loro realizzazione.

Tale materiale determina da un lato la sensibilità spettrale¹², dall'altro la lunghezza d'onda caratteristica. I foto-rilevatori, rispetto ai termo-rilevatori, sono caratterizzati da uno spettro di lunghezza d'onda meno ampio, ma possiedono una maggiore sensibilità (fino alle 100 volte maggiore) e una risposta di frequenza più elevata. Tra i foto-rilevatori più utilizzati troviamo l'antimoniuro di Indio (InSb) raffreddato alla temperatura dell'azoto liquido ($\approx 77\text{K} \approx -196^\circ\text{C}$) caratteristico del vicino infrarosso, ed il tellurato di cadmio e mercurio che ha il compito di analizzare in maniera puntuale tutta la superficie e riuscire a delineare una mappa termica accurata.

Le termocamere non raffreddate, invece, montano un sensore costituito da un microbolometro realizzato mediante una matrice di rilevatori; tale sensore è assimilabile ai sensori delle moderne *fotocamere digitali*. I microbolometri sono sensori a matrice, in cui ogni elemento sensibile rappresenta una porzione dell'oggetto indagato; più grande sarà la matrice, migliore è la capacità del sensore di rappresentare il corpo. In commercio, per scopi civili, esistono matrici che vanno da un minimo di 4x4 ad un massimo di 640x480.

SISTEMA DI SCANSIONE

Tale sistema è necessario per acquisire immagini. Costituito da un sistema di specchi in grado di scansionare l'immagine e imprimere ogni punto sul sensore stesso. Tale sistema è costituito da due specchi e due prismi rotanti, uno su asse verticale e uno su asse orizzontale, con un numero di facce uguale alla risoluzione geometrica della termocamera stessa: una termocamera con una risoluzione¹³ 160 x 120 pixel sarà dotata di un sistema di scansione costituito da due prismi rotanti, quello che ruota attorno all'asse verticale ha 160 facce che scansionano la riga mentre quello che ruota attorno all'asse orizzontale ha 120 facce che scansionano la colonna.

¹² Sensibilità spettrale: efficienza di lettura, per ogni lunghezza d'onda, della percentuale di fotoni assorbiti (vedi paragrafo successivo).

¹³ Risoluzione: vedi paragrafo successivo.

OBIETTIVO o OTTICA

L'ottica costituita da lenti al germanio, impedisce l'ingresso allo spettro della radiazione visibile ed è, invece, trasparente al passaggio della banda dell'infrarosso con lunghezza d'onda compresa tra i due e i quattordici micron. Messa a fuoco gestita elettronicamente dall'unità di elaborazione o effettuata manualmente dall'operatore. Le termocamere non raffreddate prevedono la sostituzione delle lenti o l'utilizzo di ottiche aggiuntive.

PRINCIPALI DIFFERENZE

La principale differenza tra le termocamere raffreddate e quelle non raffreddate è la presenza, nelle prime, di un sistema di raffreddamento necessario per garantire alta precisione e un'immagine priva di disturbi. Tale impianto mantiene il sensore della termocamera alla temperatura più bassa possibile e indipendente dalla temperatura dell'ambiente circostante, in modo da attenuare i disturbi derivanti dal sensore stesso e dalle altre schede elettroniche che compongono la termocamera.

Esistono quattro tipi diversi di sistemi di raffreddamento:

1. **Sistema criogenico a circuito aperto:** periodicamente viene inserito nel circuito (all'interno di un vaso di Dewar) dell'azoto liquido (-196°C). Una volta terminato l'azoto, l'operatore deve provvedere a riempire nuovamente il vaso di Dewar. Problemi legati al trasporto ed immagazzinamento dell'azoto liquido, problemi di sicurezza per gli operatori, apparecchiature ingombranti che spesso necessitano di sistemi di alimentazione supplementari;
2. **Sistema aperto:** viene inserito dell'argon allo stato liquido (-186°C). Presenta le stesse problematiche del sistema criogenico;
3. **Sistema termoelettrico** (-70°C): sistema più semplice rispetto ai precedenti, ma il sensore si trova a temperature maggiori a cui corrisponde una precisione dell'immagine ridotta. Tale sistema presenta l'inconveniente dell'uso di batterie molto ingombranti;
4. **Sistema a ciclo Stirling:** questo sistema riesce a sottrarre una grande quantità di calore mantenendo il sensore alla temperatura di -197°C

utilizzando cicli frigoriferi di compressione ed espansione realizzati mediante una pompa a pistone in un circuito chiuso di elio in fase gassosa. È il secondo sistema più utilizzato dopo il sistema criogenico, la sua criticità sta nell'elevato consumo elettrico e, quindi, nella necessità di grosse e pesanti batterie.

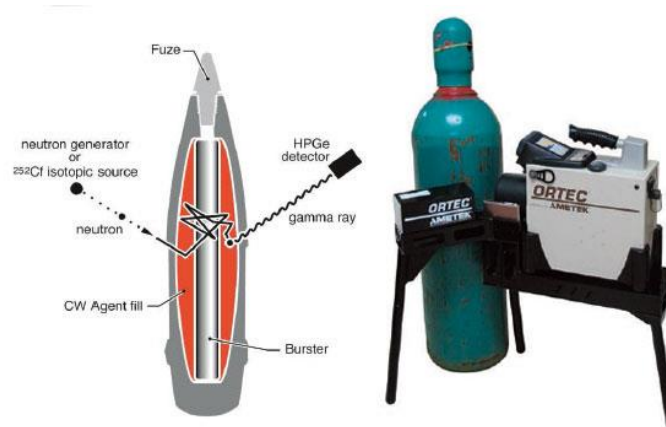


Fig. 2.1 Sistema portatile ORTEC PINS per analisi non-distruttiva, raffreddato elettronicamente.

Con le termocamere non raffreddate, non dovendo provvedere alla manutenzione di un sistema di raffreddamento, si riducono al minimo i costi di intervento e si massimizza la funzionalità del prodotto. Per questo tipo di termocamera è prevista una batteria ricaricabile incorporata e non sono quindi necessarie batterie esterne o cavi di alimentazione. Ne deriva, quindi, uno strumento più pratico, maneggevole, di facile utilizzo e trasporto.



Fig. 2.2 Termocamera non raffreddata.

L'altra fondamentale differenza è rappresentata dai tempi di risposta: come già puntualizzato le termocamere non raffreddate possiedono un elevato tempo di

risposta; al contrario di quelle raffreddate nelle quali i tempi di risposta sono molto brevi (elevato *frame-rate*¹⁴).

2.1 PARAMETRI FONDAMENTALI

Diversi sono i parametri fondamentali che caratterizzano la moltitudine di termocamere commercializzate. In questo paragrafo vengono trattati i principali parametri da prendere in considerazione per effettuare un acquisto e un utilizzo corretti ed adeguati alle esigenze.

RANGE DI RIPRESA

È la scala termica che l'operatore andrà a considerare durante la battuta termica. Le scale termiche sono varie; *range* tipici sono da -40° a +120°C, da +20 a +60°C oppure da 0° a +500°C. In ambito industriale esistono anche *range* di ripresa che arrivano ai +2000°C.

RISOLUZIONE TERMICA

Massima differenza in termini di gradi che il sensore della termocamera è in grado di percepire su una medesima immagine. Maggiore è la risoluzione termica, migliore è il sensore e quindi migliore è la sua risposta. Una buona risoluzione termica consentirà di stimare nel miglior modo possibile anche le minime differenze di temperatura. La risoluzione termica non deve essere confusa né con la risoluzione geometrica né con il concetto di precisione termica¹⁵.

RANGE SPETTRALE

Finestra dello spettro infrarosso che la termocamera va ad analizzare.

I due diversi tipi di range che troviamo in commercio sono raffigurati da:

- Il vicino infrarosso **short wave** (equivalente all'infrarosso medio = 2-5 μm);
- L'infrarosso lontano **long wave** (8-15 μm).

¹⁴ Frame-rate (frequenza dei fotogrammi): velocità di cattura o di riproduzione di fotogrammi.

¹⁵ Precisione termica: accuratezza della misura in scala assoluta della temperatura su un determinato oggetto; è uguale in tutte le apparecchiature a circa $\pm 2\%$ della lettura (la termocamera non è uno strumento in grado di misurare la temperatura assoluta di un oggetto).

Le termocamere che lavorano in *long wave* hanno il pregio di lavorare in campo spettrale lontano da quello del visibile, non subendo, in questo modo, gli effetti dati dalla policromia dell'oggetto analizzato (spesso gli oggetti presentano diverse colorazioni superficiali). Per questo tipo di termocamera, il vetro risulta completamente opaco alla radiazione infrarossa. Le termocamere *short wave*, invece, lavorando in campo più vicino al visibile, possono risentire della colorazione dell'oggetto, ma riescono ad analizzare un elemento celato da una lastra di vetro (vetro singolo con spessore esiguo), seppur con un'attenuazione termica. Le termocamere non raffreddate lavorano tutte in *long wave*.

RISOLUZIONE GEOMETRICA

La risoluzione geometrica del sensore, equivale al numero di pixel che compongono la matrice del sensore stesso. In commercio esistono differenti risoluzioni geometriche del sensore, e vanno da un minimo di 120 x 120 pixel a un massimo di 640 x 480 (limite dettato da brevetto militare).

IFOV (Instantaneous Field Of View)

Indica quanto è grande la superficie analizzata da un singolo pixel del sensore ad una determinata distanza (esempio: termocamera con un IFOV¹⁶ di 3,1 mrad vuol dire che ad una distanza di 1 m dal sensore, la grandezza del singolo pixel sarà pari a 3,1 mm, a 10 m sarà 31 mm=3,1 cm; vedi fig. 2.3). Tale parametro dipende dalla risoluzione geometrica e dall'ottica montata.

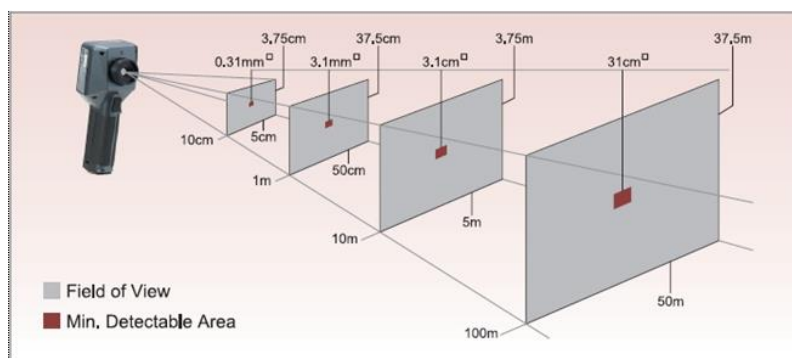


Fig. 2.3 Schema di funzionamento per una termocamera caratterizzata da un IFOV=3.1mrad.

¹⁶ IFOV: angolo solido espresso in milliradiani, rappresentato mediante una piramide con base rettangolare il cui vertice corrisponde ad un pixel del sensore mentre la base della piramide costituisce la grandezza del pixel ad una determinata distanza (vedi [1] p.68).

OBBIETTIVO

Negli ultimi anni sono state introdotte ottiche aggiuntive da poter montare sulle termocamere che in realtà usano ottiche fisse.

FREQUENZA DI ACQUISIZIONE

Indica la quantità di immagini che la termocamera è in grado di acquisire in un secondo (*frame-rate*). Un'alta frequenza di acquisizione è necessaria per analizzare immagini in movimento.

2.2 TERMOCAMERA TESTO

La termocamera in dotazione presso Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale dell'Università di Bologna è una Testo 882 non raffreddata, e presenta le seguenti caratteristiche di base e dati tecnici:

CARATTERISTICHE DI BASE

Obiettivo quadrangolare HQ (High – Quality) 32° x 23°, rilevatore 320x240, NETD < 60 mK, distanza focale minima 20 cm, camera digitale integrata con power LEDs (Light Emitting Diodes) per illuminazione, messa a fuoco automatica o manuale, min. / max. on area, commenti audio, display della distribuzione di umidità sulla superficie.

DATI TECNICI

| Dati del prodotto | Testo 882 |
|--|---|
| Prestazioni immagini Infrarosse | |
| Campo visivo / distanza messa a fuoco min. | Obiettivo standard: 32° x 23° / 0,2 m |
| Sensibilità termica (NETD) | < 60 mK a 30 °C (86 °F) |
| Risoluzione geometrica (IFOV) | Obiettivo standard: 1,7 mrad |
| Frequenza di aggiornamento immagini | 33 Hz per UE, altrimenti 9 Hz |
| Messa a fuoco | Manuale e motorizzata |
| Tipo di rilevatore / Variazione dello spettro | FPA 320 x 240 pixel, a.Si / da 8 a 14 µm |

| | |
|--|--|
| Visiva | |
| Formato immagine / distanza min. di messa a fuoco | 640 x 480 pixel / 0.4 m |
| Presentazione immagine | |
| Visualizzazione immagine | LCD da 3,5" con 320 x 240 pixel |
| Opzioni di visualizzazione | solo immagine a infrarossi/ solo immagine reale/ immagine reale e a infrarossi |
| Uscita video | USB 2.0 |
| Palette di colori | 9 opzioni: ferro, arcobaleno, freddo-caldo, blu-rosso, grigio, grigio invertito, seppia, Testo, ferro HT |
| Misura | |
| Range di temperatura | da -20 °C a 100 °C / da 0 a +350 °C (commutabile) |
| Misura delle temperature elevate (opzionale) | da +350 °C a +550 °C |
| Precisione | ±2 °C, ±2% del v.m. (da -20 °C a +350 °C) / ±3% del v.m. (da +350 °C a +550 °C) |
| Emissività / compensazione di temperatura riflessa | da 0,01 a 1 / manuale |



Fig.2.4 Termocamera Testo 882.

2.3 CALCOLO DELLA TEMPERATURA

Durante la ripresa termografica la termocamera riceverà radiazioni non solo dal corpo indagato, ma anche dall'ambiente circostante. Le radiazioni che quindi giungeranno al sensore della termocamera possono essere così schematizzate (vedi Fig. 2.5):

- Radiazione emessa dal corpo;
- Radiazione dell'ambiente circostante, riflessa dalle superfici dell'oggetto esaminato ed attenuata, in parte, dall'atmosfera nel percorso dal corpo al sensore;
- Radiazione atmosferica.

A queste potranno essere aggiunte: radiazioni provenienti da sorgenti vicine o, comunque, esterne al campo visivo, o disturbi legati alla dispersione della luce solare. Tali radiazioni sono trascurate in questa trattazione per motivi analitici e perché il loro contributo è spesso marginale; spetta all'operatore, nel caso non fossero trascurabili, aggiornare la configurazione delle radiazioni in ingresso o migliorare le condizioni di ripresa (ad esempio le sorgenti di radiazioni intense possono essere schermate mediante lastre spesse di vetro).

Per il calcolo della temperatura di un oggetto, derivante dal segnale di uscita della termocamera, si considera (per brevi distanze) che l'energia irradiata da un corpo nero (W) alla temperatura T_{source} (temperatura della sorgente) genera un segnale di uscita dell'apparecchiatura pari a:

$$U_{source} = CW(T_{source}) \Rightarrow CW_{source} \quad ([2]);$$

dove C è una costante. Se la sorgente è un corpo grigio l'energia irradiata sarà pari a εW_{source} dove ε rappresenta l'emissività del corpo grigio (come precedentemente specificato: vedi paragrafo 1.3.2).

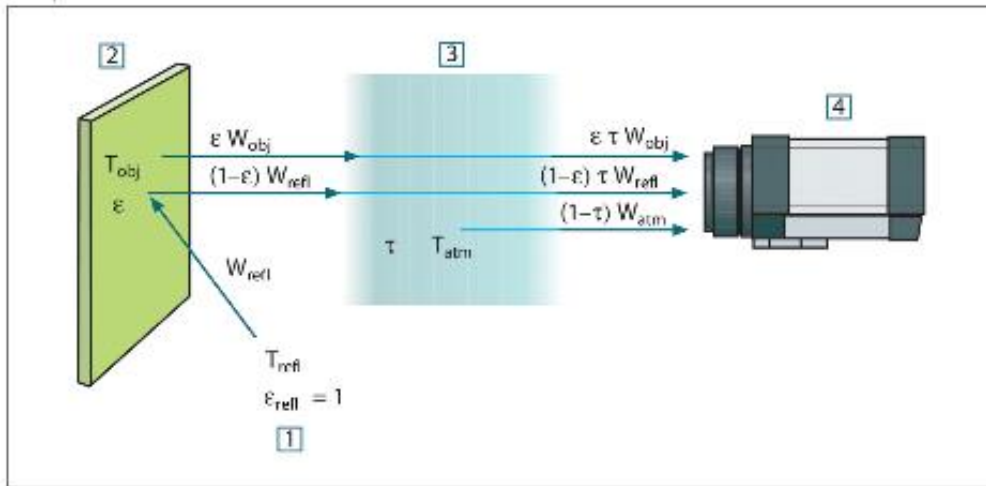


Fig. 2.5 Rappresentazione schematica della configurazione durante una misurazione termografica: 1=area circostante, 2=oggetto, 3=atmosfera, 4= termocamera.

Sapendo che la radiazione irradiata, ricevuta dal sensore della termocamera, è costituita da tre elementi, riportiamo di seguito la loro descrizione:

1. Radiazione emessa dal corpo = $\varepsilon\tau W_{obj}$ (ε = emittanza¹⁷ del corpo; τ = trasmittanza del corpo; W_{obj} calcolata alla temperatura T_{obj});
2. Radiazione dell'ambiente circostante, riflessa dalle superfici dell'oggetto = $(1 - \varepsilon)\tau W_{refl}$ (in questo caso si ipotizza che la temperatura sia costante e pari a T_{refl} e che $\varepsilon_{refl} = 1$ in modo che la legge di Kirchhoff sia verificata);
3. Radiazione dell'atmosfera = $(1 - \tau)W_{atm}$ ($(1-\tau)$ è pari all'emittanza dell'atmosfera; W_{atm} calcolata alla temperatura T_{atm}).

Da tale schematizzazione si ottiene la seguente relazione:

$$W_{tot} = \varepsilon\tau W_{obj} + (1 - \varepsilon)\tau W_{refl} + (1 - \tau)W_{atm} \quad ([2]);$$

da cui, come evidenziato nella formula $U_{source} = CW_{source}$, moltiplicando tutti i membri dell'equazione per la costante univoca C si ricava:

$$CW_{tot} = \varepsilon\tau CW_{obj} + (1 - \varepsilon)\tau CW_{refl} + (1 - \tau)CW_{atm} \quad ([2]);$$

e quindi:

¹⁷ Emittanza: si parla di emittanza, e non di emissività, in un determinato punto, in una certa direzione e a una data temperatura e lunghezza d'onda se il corpo indagato presenta elevata rugosità senza direzioni preferenziali.

$$U_{tot} = \varepsilon\tau U_{obj} + (1 - \varepsilon)\tau U_{refl} + (1 - \tau)U_{atm} \quad ([2]).$$

| | |
|---------------|--|
| ε | Emittanza del corpo |
| τ | Trasmittanza del corpo |
| U_{tot} | Tensione totale, uscita della termocamera |
| U_{obj} | Tensione del corpo (variabile da calcolare); può essere convertita nella temperatura reale dell'oggetto indagato |
| U_{refl} | Tensione riflessa |
| U_{atm} | Tensione dell'atmosfera |

Da tale legge deriva poi U_{obj} (formula generale), che sarà pari a:

$$U_{obj} = \frac{1}{\varepsilon\tau} U_{tot} - \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} U_{refl} - \frac{(1-\tau)}{\varepsilon\tau} U_{atm} \quad ([2]).$$

È necessario, a questo punto, identificare i valori di un gruppo di parametri fondamentali per un calcolo corretto della temperatura:

- Distanza dall'oggetto;
- Umidità;
- Temperatura ambientale riflessa dalle pareti dell'oggetto (T_{refl});
- Temperatura atmosferica (T_{atm});
- Emittanza dell'oggetto (ε).

Il calcolo del valore dell'ultimo parametro spesso può essere complicato; vi sono diversi metodi applicativi e studi che semplificano, o per lo meno chiariscono tale operazione. Ad esempio è possibile utilizzare un termometro a contatto per rilevare la temperatura effettiva iniziale del componente e impostarla a mano sulla termocamera, o utilizzare un *target* a emissività nota. La calibrazione della termocamera è automatica e viene effettuata all'accensione della stessa con l'ausilio di un corpo di riferimento o attraverso l'uso del tappo di protezione.

2.4 IMPOSTAZIONE DEI PARAMETRI FONDAMENTALI

Come espresso nel precedente paragrafo, durante una battuta termografica, è necessario impostare nella termocamera i valori dei parametri fondamentali (es.: emissività dell'oggetto indagato, temperatura ambientale riflessa dalle pareti dell'oggetto, umidità etc.) necessari per ottenere una corretta rappresentazione termica superficiale del corpo esaminato, avvicinandosi il più possibile alla distribuzione reale [1, 2, 3, 10].

EMISSIVITA'

L'impostazione dell'emissività varia da corpo a corpo. Generalmente, emissività comprese tra 0.1 e 0.95 (casi limite: corpo nero $\varepsilon=0$, corpo perfettamente riflettente $\varepsilon=1$) si addicono a diversi materiali e trattamenti superficiali (ad esempio la verniciatura¹⁸). I materiali metallici possiedono una bassa emissività che aumenta con la temperatura. Per i non metalli l'emissività è elevata e tende a diminuire con la temperatura. Sono riportati di seguito alcuni metodi utilizzati per rilevare e valutare tale parametro. Tali procedure dovranno essere eseguite ogni qualvolta che l'operatore debba monitorare diversi materiali e caratterizzati da altrettante emissività.

- Tramite uso di *target*: si stima l'emissività dell'oggetto indagato mediante l'uso di una *target* a emissività nota. Si fissa sul corpo di cui si vuole conoscere la misura di tale parametro, un *target* di emissività nota (si può utilizzare ad esempio un pezzo di nastro isolante nero opaco $\varepsilon=0.97$) e si aumenta la temperatura del corpo. A questo punto attraverso la termocamera si valuta la temperatura sul target, non sull'oggetto, impostando l'emissività pari a quella nota del target. Successivamente, spostandosi sulla superficie del corpo a emissività non nota e rilevando la temperatura, l'operatore modifica il valore di emissività fino a ottenere la stessa temperatura rilevata nella precedente misurazione effettuata sul

¹⁸L'emissività delle vernici varia in base alle loro componenti e non in base al colore: vernici all'olio presentano un'emissività superiore a 0.9.

target. È così possibile ottenere una stima dell'emissività dell'oggetto indagato;

- Tramite uso di un termometro a contatto: con l'aiuto di un termometro a contatto l'operatore rileva, prima di tutto, la temperatura del corpo da esaminare. Successivamente ispeziona un punto dell'oggetto per mezzo della termocamera e modifica il valore dell'emissività fino a quando la temperatura rilevata dalla termocamera non eguaglia quella rilevata tramite il termometro.

TEMPERATURA E UMIDITA' AMBIENTALE

La misura della temperatura ambientale e dell'umidità relativa, è fondamentale per un corretto svolgimento di misurazione termografica; da queste dipenderanno l'intensità delle radiazioni emesse e riflesse dall'oggetto considerato e la sua trasmittanza, che presenta una componente variabile in base all'umidità. Tali parametri sono calcolati mediante un termoigrometro (strumento meteorologico costituito da un termometro e un igrometro).

DISTANZA DALL'OGGETTO DA INDAGARE

L'operatore rileva la distanza tra l'oggetto indagato e l'obiettivo della termocamera attraverso un puntatore laser o mediante un metro, in modo da considerare l'attenuazione della radiazione percepita dalla termocamera, che si ha durante tale percorso.

TEMPERATURA RIFLESSA

La corretta impostazione di questo fattore migliora la misura termografica. Nella maggior parte dei casi coincide con la temperatura ambiente. Tuttavia quando nelle vicinanze dell'oggetto da indagare vi sono sorgenti di radiazioni a elevata temperatura, l'operatore dovrà provvedere a schermare in maniera opportuna tali sorgenti, o misurare precisamente il valore della temperatura riflessa come spiegato in [2, 10].

3 LA TERMOGRAFIA ATTIVA E LE TECNICHE INNOVATIVE

Come evidenziato nei capitoli precedenti, negli ultimi anni, la termografia ad infrarossi si è affermata come metodo ampiamente utilizzato per test non distruttivi, e può essere utilizzata come alternativa o complemento alle comuni tecnologie di controllo. In particolare, la termografia attiva trova ampio utilizzo in campo meccanico e industriale, per la verifica dell'usura e dell'integrità di un pezzo, ed è la tecnica scelta per gli studi portati avanti in questo lavoro di tesi.

3.1 DIFFERENTI TECNICHE DI TERMOGRAFIA ATTIVA

Per quanto riguarda la termografia attiva, sono stati sviluppati diversi approcci, che si differenziano a seconda del metodo di sollecitazione termica: termografia ad impulso (*Pulsed Thermography*), riscaldamento a gradini (*Step Heating*), termografia lock-in (*Lock-in Thermography*), termografia con fase pulsata (*Pulsed Phased Thermography*), vibro-termografia (*Vibro Thermography*) [1, 3].

TERMOGRAFIA AD IMPULSO (PT)

Molto utilizzata nel campo delle prove termografiche non distruttive, rappresenta uno dei metodi di stimolazione termica più usati. Il controllo, si basa su una stimolazione termica a impulsi di durata variabile, che vanno da pochi millisecondi (**ms**) (per ispezionare superfici caratterizzate da un'elevata conducibilità termica, ad esempio superfici metalliche), ad alcuni secondi (ispezione di campioni a bassa conducibilità termica, ad esempio plastiche), ed in genere è molto rapido. Il riscaldamento consiste nel portare il componente a una temperatura di pochi gradi superiore alla temperatura iniziale, mediante potenti lampade alogene o allo xeno, laser, fasci di luce concentrati o flussi d'aria (calda o fredda), e non produce danni di alcun tipo sul componente. Fondamentalmente, la termografia pulsata, consiste nel riscaldare brevemente il campione e registrare mediante una termocamera l'andamento della temperatura superficiale. Dato che, sotto lo strato corticale, l'energia termica si propaga per diffusione, si nota un decadimento della temperatura; la presenza di un difetto interno provoca

disomogeneità nella distribuzione della temperatura superficiale del materiale, determinando così un'area a temperatura maggiore rispetto all'area circostante. Grazie alla ripresa termografica si noterà la presenza di un "accumulo di calore". In questo modo è possibile individuare con facilità crepe o piccole fenditure del materiale prossime alla superficie; per riuscire a rilevare difetti che si trovano più in profondità saranno necessari tempi di sollecitazione termica più elevati. Risultati migliori sono ottenibili attraverso l'uso di metodi avanzati di elaborazione dei segnali e diverse fonti di sollecitazione termica. Più nel dettaglio è possibile prevedere diverse configurazioni d'ispezione:

- a. **Punto di controllo:** riscaldamento uniforme ottenuto con un laser. L'ispezione dell'intera superficie richiede tempi di osservazione elevati;
- b. **Ispezione di linea:** riscaldamento attraverso lampade, scansione laser, linea di getti d'aria (fredda o calda); uniformità nel riscaldamento ed elevata velocità d'ispezione (fino a $1 \text{ m}^2/\text{s}$);
- c. **Ispezione della superficie:** riscaldamento realizzato mediante lampade allo xeno, lampade flash alogene o scansione laser. Riscaldamento non uniforme (trattandosi di un'intera superficie).

L'utilizzo di una sorgente termica fredda può essere interessante quando la temperatura della parte da ispezionare è già superiore alla temperatura ambiente. Il vantaggio di una sorgente termica fredda è che non induce riflessioni termiche nella fotocamera IR, mentre i principali limiti derivano da considerazioni di natura pratica. Ad esempio, generalmente, è più semplice e conveniente riscaldare una superficie piuttosto che raffreddarla. Nella PT sono possibili due metodi di osservazione, definiti dalla posizione della sorgente termica:

- 1 **In riflessione:** la sorgente termica e la termocamera sono situate dallo stesso lato rispetto alla superficie del componente ispezionato;
- 2 **In trasmissione:** la fonte di riscaldamento e la termocamera sono posizionati su lati opposti rispetto alla superficie del campione.

Generalmente, l'approccio in riflessione è utilizzato per il rilevamento di difetti situati vicino alla superficie riscaldata mentre l'approccio trasmissione consente di rilevare difetti in prossimità della superficie posteriore¹⁹.

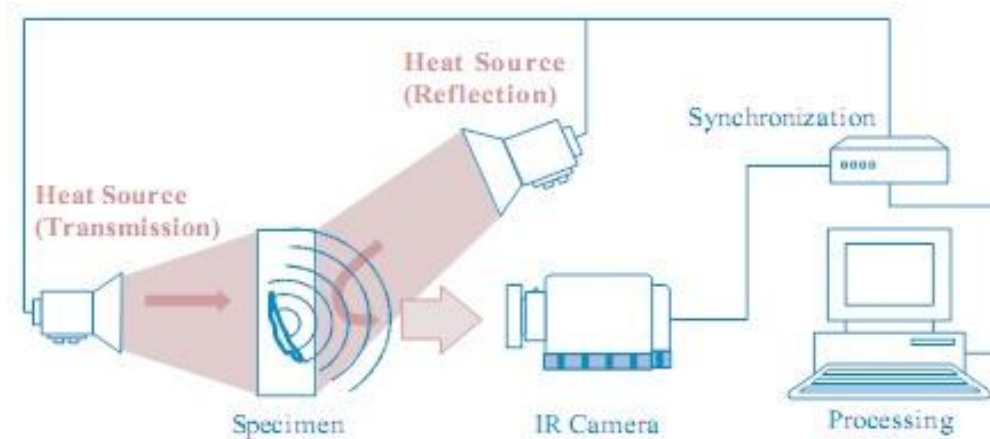


Fig. 3.1 Modalità di ispezione in riflessione e in trasmissione.

In entrambi i casi, l'elaborazione delle immagini attraverso opportuni software permette una migliore visibilità dei difetti.

RISCALDAMENTO A GRADINI (SH)

Questa tecnica è simile al precedente sistema in cui è di interesse il monitoraggio del decadimento della temperatura negli istanti successivi al riscaldamento. In questo caso, invece, l'aumento della temperatura superficiale è monitorato durante l'applicazione di un impulso a gradini ("impulso lungo"), dove il campione viene riscaldato continuamente a bassa potenza. In pratica viene monitorato l'evolversi della temperatura durante e dopo il processo di riscaldamento. SH trova applicazione per la valutazione di: spessori di rivestimento, strutture composite e corrosione di parti nascoste. In una configurazione tipica per indagini SH, un laser ad argon è utilizzato per fornire la linea di calore. Due tipi di misura sono possibili:

- Scansione in un momento specifico dopo il riscaldamento;
- Scansioni in funzione del tempo.

¹⁹ Se la superficie posteriore non è accessibile, il metodo in trasmissione non è applicabile.

TERMOGRAFIA *LOCK-IN* (LT)

Questo metodo si basa sulla generazione di onde termiche²⁰ all'interno del campione sottoposto a esame. Queste onde possono essere generate e rilevate in remoto, ad esempio applicando periodicamente calore sulla superficie del campione mediante l'uso di una lampada. Il nome *lock-in* fa riferimento alla necessità di controllare l'esatta dipendenza temporale tra il segnale termico in uscita dall'oggetto e il segnale di riferimento (modulato) in ingresso nell'attrezzatura utilizzata. Il campo di temperatura risultante sarà anch'esso di tipo oscillatorio e, quindi, caratterizzato da una fase e un'ampiezza che potranno essere messe in relazione, rispettivamente con il tempo di propagazione e la diffusività termica. Attraverso l'opportuna apparecchiatura si potranno osservare l'ampiezza e la fase dell'onda termica risultante sul provino. Sono previste due tipologie di stimolazione per la LT:

1. Termografia *Lock-in* a induzione: sollecitazione termica ottenuta sfruttando il principio delle correnti parassite generate in corpi metallici immersi, o liberi di muoversi, in un campo magnetico;
2. Termografia *Lock-in* a ultrasuoni: sollecitazione termica generata da una sorgente ad ultrasuoni.

Le applicazioni tipiche sono: rilevamento della corrosione, di crepe verticali e di delaminazioni degli strati superficiali nei materiali compositi. Eventuali cricche possono essere identificate grazie a un aumento locale della densità di corrente e, quindi, di temperatura.

TERMOGRAFIA CON FASE PULSATA (PPT)

È una tecnica d'indagine che unisce i vantaggi della PT e della LT. L'oggetto è riscaldato mediante impulsi come nella PT e come in LT, è possibile esplorare le varie frequenze e ricavare immagini termiche di fase [3]. Tuttavia la termografia con fase pulsata è eseguita in modalità transitoria mentre in LT il segnale è registrato in modo statico; ciò implica una maggiore qualità delle immagini qualora si adottasse la modalità di indagine in LT.

²⁰ Onde termiche: onde sinusoidali (moto oscillatorio).

VIBROTERMOGRAFIA (VT)

Tale tecnica d'indagine utilizza l'effetto di vibrazioni meccaniche, caratterizzate da poche e specifiche frequenze fisse, prodotte dall'esterno sulla struttura in modo da evidenziarne cricche o de-laminazioni superficiali: il calore è rilasciato per attrito. Si ha una conversione diretta da energia meccanica in energia termica, e i difetti, sollecitati con specifiche risonanze meccaniche vibrano in maniera indipendente dal resto della struttura. Le frequenze di eccitazione sono fisse nella maggior parte dei casi applicativi; anche se è possibile modificarle in modo da individuare gradienti termici locali, portando in superficie difetti che, con altre frequenze, non si sarebbero visualizzati. I punti in cui s'individuano temperature maggiori, rappresentano punti danneggiati o che porteranno a rotture future. I principali vantaggi sono il rilevamento di difetti difficilmente visibili da altri sistemi termici all'infrarosso e il controllo rapido di ampie aree strutturali.



Fig. 3.2 Diversi sistemi di sollecitazione termica: andando da sinistra a destra, due flash alogeni (PT); un trasduttore ultrasonico (VT); una bobina elettromagnetica (LT a induzione).

3.2 TECNICHE INNOVATIVE

Nel campo *dell'immagine processing*²¹ si è sempre cercato di ottenere immagini il più nitide e definite possibile, ma la complessità nella costruzione di sensori ad alta risoluzione (sia per apparecchiature che lavorano nel campo del visibile che per quelle ad IR) ed i relativi costi rappresentano un grosso ostacolo, soprattutto in campo civile (dispositivi a basso costo). Negli ultimi anni, quindi, si è cercato di ovviare a tali problemi concentrandosi sull'elaborazione delle immagini utilizzando software in grado di ottenere immagini ad alta risoluzione (*High Resolution - HR*) elaborando e sovrapponendo, tramite complessi algoritmi, due o

²¹ *Image processing*: elaborazione elettronica delle immagini, in modo tale da ottenere un miglioramento delle informazioni.

più immagini a bassa risoluzione (*Low Resolution - LR*) (vedi Fig. 3.3). Questa tecnica è conosciuta con il nome di super-risoluzione (*Super-Resolution - SR*).

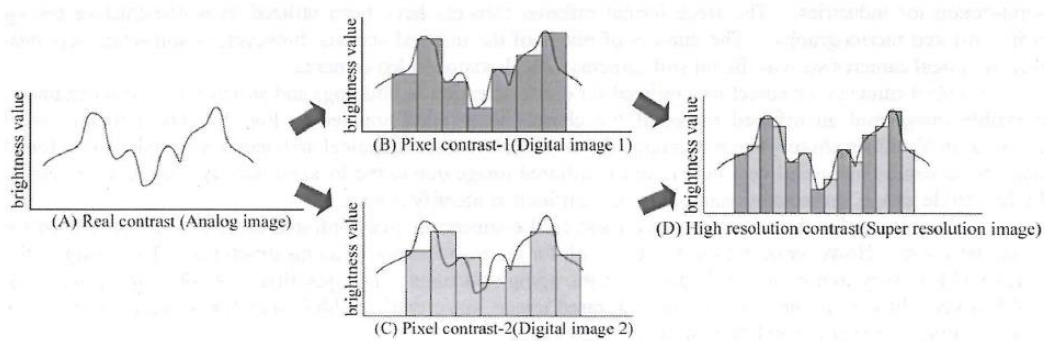


Fig. 3.3 Schematizzazione tecnica SR a partire da due immagini LR.

Più di una casa produttrice di sistemi a bassa risoluzione ha implementato la super-risoluzione con gli approcci e soluzioni diverse in funzione delle occorrenze e dei campi di ricerca. Le specifiche matematiche e computazionali degli algoritmi di post-elaborazione spesso non sono disponibili all'utente finale, in quanto coperti da brevetto, così come nel caso della termocamera Testo utilizzata in questa campagna sperimentale [13].

Tale tecnica non è una semplice interpolazione di dati, ma una ricostruzione dei pixel mancanti nelle immagini a bassa risoluzione: il numero delle immagini LR elaborate non è specificato, ma si può logicamente ipotizzare che si parta da un minimo di due foto, o probabilmente di più (ad esempio quattro), acquisite sfruttando i movimenti involontari della mano durante la battuta termografica. Le immagini HR ottenute saranno caratterizzate da un numero quadruplo di pixel, nel caso della termocamera testo 882 da immagini LR 320x240 otteniamo immagini HR 640x480.

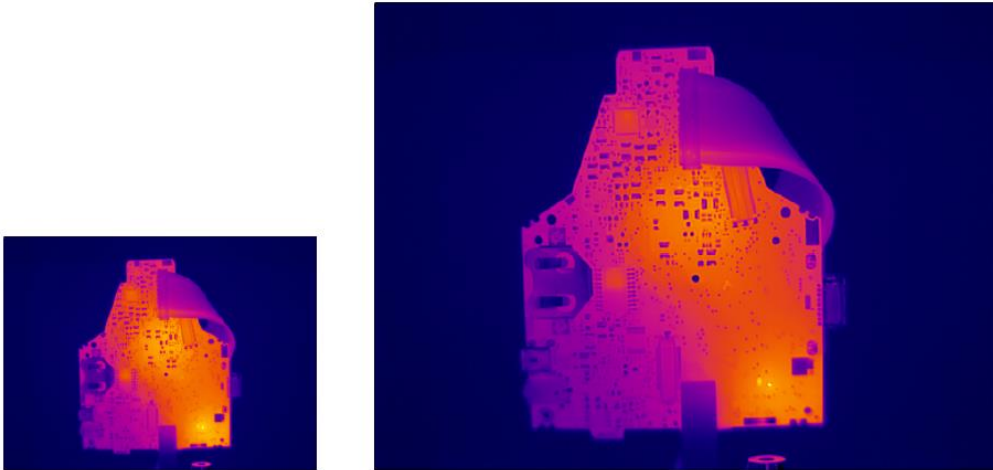


Fig. 3.4 Immagine 320x240 (a sinistra); immagine 640x480 (a destra).

L'aspetto più interessante di questi algoritmi è la determinazione dello *shift* delle diverse immagini LR rispetto a una di riferimento (vedi Fig. 3.5).

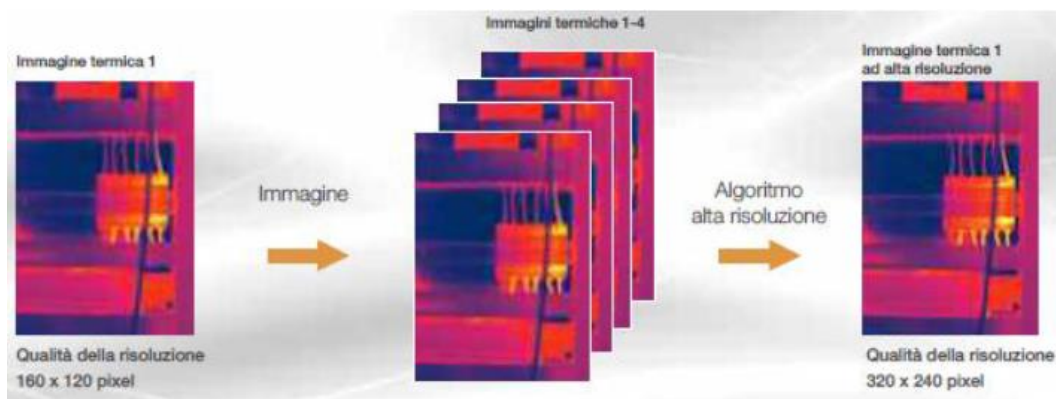


Fig. 3.5 Schema rappresentativo della tecnica della SR per ottenere un'immagine a 320x240 partendo da un'immagine a 160x120.

Per comprendere la metodologia utilizzata per la determinazione dello *shift* verrà illustrata in maniera semplificata la teoria proposta in [12, 14] in cui si applica un metodo bidimensionale, che prevede la minimizzazione della funzione d'intensità complessiva dei vari pixel:

$$SSD(dx, dy) = \sum_{x,y \in W} (I_1(x, y) - I_2(x + dx, y + dy))^2 \quad ([14]);$$

| | |
|----------|--|
| I_1 | Intensità dei pixel dell'immagine di riferimento |
| I_2 | Intensità dei pixel dell'immagine "shiftata" |
| (x, y) | Coordinate dei punti della regione W di sovrapposizione delle immagini |
| dx | Valori di <i>shift</i> nella direzione x |
| dy | Valori di <i>shift</i> nella direzione y |

I valori (\bar{dx}, \bar{dy}) minimizzano la funzione SSD^{22} : tali coefficienti sono calcolati ipotizzando che cinque valori SSD noti appartengano ad un paraboloide bidimensionale, dove \bar{dx} e \bar{dy} ne rappresentano le coordinate del vertice.

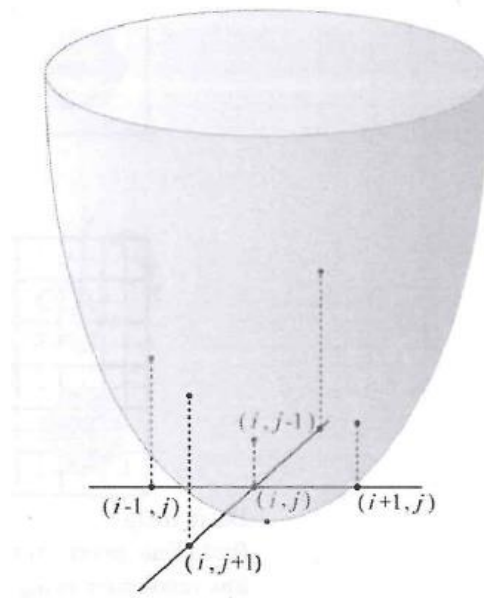


Fig. 3.6 Paraboloide rappresentante i punti SSD.

3.3 OTTIMIZZAZIONE DELLA TECNICA DI SUPER-RISOLUZIONE

Come precisato, la tecnica della super-risoluzione sfrutta i micromovimenti della mano durante una ripresa termografica in modo tale da acquisire più immagini LR, per poi elaborarle e ottenere un'unica immagine HR. Ciò implica che, nel caso in cui si vogliano ottenere immagini georeferenziate ad alta risoluzione,

²² SSD: *Square Sum of Differences* (somma degli scarti al quadrato).

quindi con termocamera fissata su cavalletto, questa opzione non è utilizzabile. Per questo motivo è stato realizzato, in un precedente lavoro di tesi, un dispositivo di fissaggio della termocamera a cavalletto che ne permette dei micromovimenti, in grado di simulare le movimentazioni involontarie dell'arto dell'operatore, necessari per acquisire immagini ad alta risoluzione tramite la tecnica della super-risoluzione [12].

Tale dispositivo è costituito da due elementi conici, uno superiore e uno inferiore, realizzati in ABS²³ (Acrilnitrile Butadiene Stirene) attraverso la macchina per la prototipazione rapida²⁴ “Dimension SST 768”, in dotazione presso il Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale dell'Università di Bologna.



Fig.3.7 Stampante 3D Dimension SST 768.

La flangia inferiore possiede all'interno un alloggiamento per una molla e un cono caratterizzato da una superficie superiore semisferica (incavata), mentre la flangia superiore presenta una superficie sferica interna su cui andare ad inserire una sfera d'acciaio. Il gioco tra le due flange è regolato per mezzo di tre bulloni. Il cono interno, da posizionare nell'alloggiamento della flangia inferiore, presenta il raggio di curvatura della superficie superiore semisferica di poco maggiore rispetto quello della sfera d'acciaio. Ciò garantisce la non staticità della

²³ ABS: resina stirolica termoplastica ottenuta per polimerizzazione di gomma butadienica con acrilnitrile e stirene o copolimero acrilnitrile/stirene. È un materiale rigido e tenace anche a basse temperature, molto duro, resistente alle scalfitture, con elevata resistenza all'urto.

²⁴ Stampante 3D: realizza prototipi in materiale plastico (ABS) utilizzando la tecnologia FDM (*Fused Deposition Modeling*).

termocamera; la coppia sferica consente l'inclinazione della parte superiore del dispositivo.

La molla inserita tra la flangia inferiore e quella superiore, assicura la sospensione di quest'ultima consentendo lo spostamento in altezza.

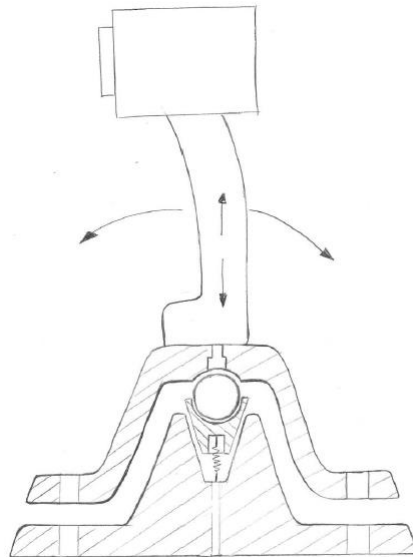


Fig. 3.8 Schizzo progettuale del dispositivo.



Fig. 3.9 Modelli realizzati in ABS: cono interno, flangia inferiore, flangia superiore.

I componenti necessari all'assemblaggio del dispositivo sono:

- Flangia superiore in ABS;
- Flangia inferiore in ABS;
- Cono interno in ABS;

- Sfera d'acciaio (diametro 22 mm);
- Molla (diametro spira 10 mm);
- 3 Bulloni M6 (per serraggio/gioco delle flange) + relative rondelle;
- Basetta cavalletto fotografico;
- Vite a passo fotografico;
- 1 bullone M5 + relativa rondella.



Fig. 3.10 Componenti necessari all'assemblaggio del dispositivo.



Fig. 3.11 Fasi dell'assemblaggio del dispositivo di fissaggio della termocamera.



Fig. 3.12 Termocamera Testo 882 con dispositivo montata a cavalletto.

Per verificarne la funzionalità è stato testato in [12] attraverso prove sperimentali, le quali prevedono l'uso di un pannello metallico dipinto con vernice epossidica nera, e di un pannello di compensato con dimensioni analoghe a quello di metallo. Il pannello metallico, quando riscaldato uniformemente (tramite una stufetta elettrica), emette una radiazione paragonabile a quella di "corpo nero", mentre quello di compensato è caratterizzato da 12 diaframmi intagliati di altezza

costante e larghezza che diminuisce al decrescere della distanza tra una fessura e l'altra.

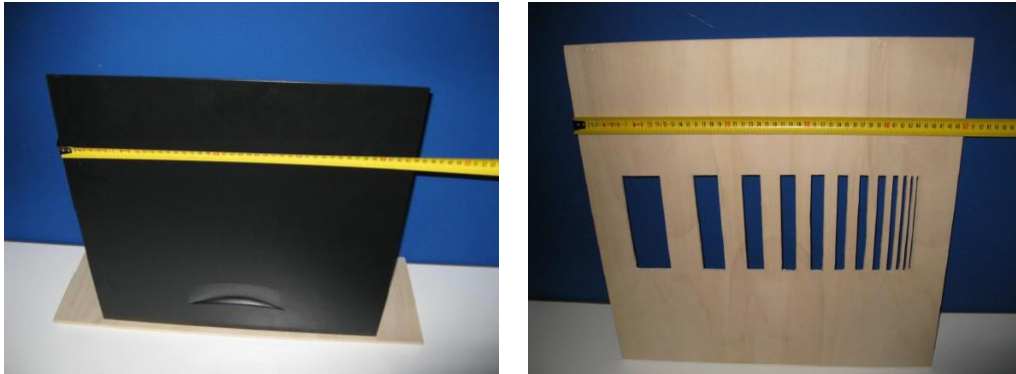


Fig. 3.13 Pannello metallico nero (sinistra); pannello di compensato intagliato (destra).

Successivamente, dopo aver posizionato la strumentazione e riscaldato in maniera adeguata il pannello nero, sono state effettuate rilevazioni termografiche con la termocamera montata sul dispositivo e fissata a un cavalletto fotografico come mostrano le seguenti figure.

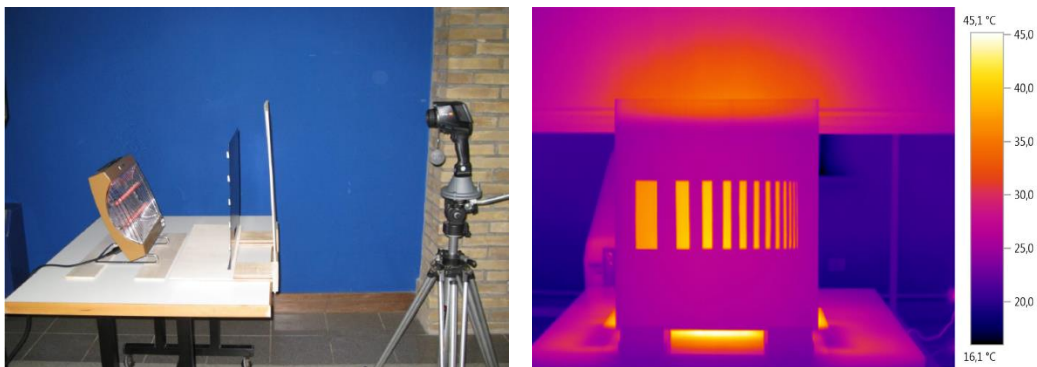


Fig. 3.14 Posizionamento strumentazione; immagine termografica del pannello intagliato.

Le rilevazioni sono state effettuate a partire da una distanza massima di 4.40 m dal pannello e avvicinandosi, di prova in prova, di una lunghezza pari a 0.40 m fino ad arrivare alla distanza limite di 1.20 m. Dopo aver scattato una sequenza di immagini sfruttando la super-risoluzione, sono state ripetute le prove alla risoluzione reale del rilevatore (320x240), per poterle, successivamente, confrontare e individuarne le differenze. Tale dispositivo ha permesso di utilizzare la tecnica della super-risoluzione, anche quando la termocamera debba essere fissata su di un cavalletto fotografico migliorando la qualità delle immagini ottenute.

4 PROVE SPERIMENTALI

Considerata la realizzazione del componente per la movimentazione della termocamera fissata su cavalletto fotografico, realizzato presso il Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale dell'Università di Bologna, e considerando l'ottimizzazione della super-risoluzione ottenuta mediante il suo utilizzo, si è cercato di individuare le possibili applicazioni e quanti e quali miglioramenti il suo impiego potesse apportare in altri ambiti d'ispezione.

L'obiettivo di questo lavoro di tesi, difatti, è quello di effettuare una sistematica campagna sperimentale volta a stabilire i miglioramenti in termini di "incremento di risoluzione" e di nitidezza di immagine portati dall'introduzione del dispositivo in sede di ispezioni termografiche a cavalletto mediante la tecnica di *super-resolution*, valutando un caso di studio di tipo industriale.

È bene ricordare che gli incrementi ottenuti nei termogrammi attraverso l'uso di tale tecnica di ripresa (la super-risoluzione), non corrispondono a veri e propri miglioramenti di risoluzione e nitidezza dell'immagine. In realtà sono artefatti realizzati mediante software, che, grazie a complessi algoritmi matematici, riescono ad ottenere una ricostruzione dei pixel mancanti nelle immagini, grazie ad una interpolazione di dati appartenenti ad una serie di immagini LR precedentemente acquisite.

La metodologia di progetto si basa su un approccio comparativo tra ispezioni termografiche con e senza *super-resolution* e con e senza cavalletto. L'indagine termografica è stata condotta mediante la tecnica attiva del riscaldamento a gradini SH. Scelta dettata dal fatto che, dovendo analizzare componenti aeronautici/meccanici (albero motore, pistone, cuscinetti, albero ad ingranaggi etc..), tale tecnica garantisce un riscaldamento adeguato ed uniforme attraverso una sollecitazione continua e a bassa potenza (impulso "lungo"); inoltre, durante il decadimento della temperatura, si sarebbero potute visualizzare cricche o difetti sub-corticali che in caso di termografia passiva o utilizzando altre tecniche di sollecitazione non sarebbero emersi dall'indagine.

Il riscaldamento dei componenti in esame è stato generato mediante l'uso di un forno elettrico ventilato. In questo modo è stato possibile stimolare i componenti

in tempi brevi e attraverso un ambiente a elevata temperatura. Trattandosi di parti industriali, la stimolazione termica tramite lampade non sarebbe stata sufficiente a riscaldare il pezzo in maniera adeguata, uniforme e in tempi ridotti, inoltre, data la lavorazione superficiale dei componenti, si sarebbero dovuti considerare effetti di riflessione considerevoli (parti metalliche lucide estremamente riflettenti).



Fig. 4.1 Forno elettrico ventilato.

La selezione del componente da sottoporre all'analisi ha visto coinvolte diverse alternative, tra cui:

- albero motore FIAT 1900 JTD (vedi Fig. 4.2);
- albero ad ingranaggi (vedi Fig. 4.3);
- pistone di una moto da corsa 125 (vedi Fig. 4.4).



Fig.4.2 Albero motore FIAT 1900 JTD.

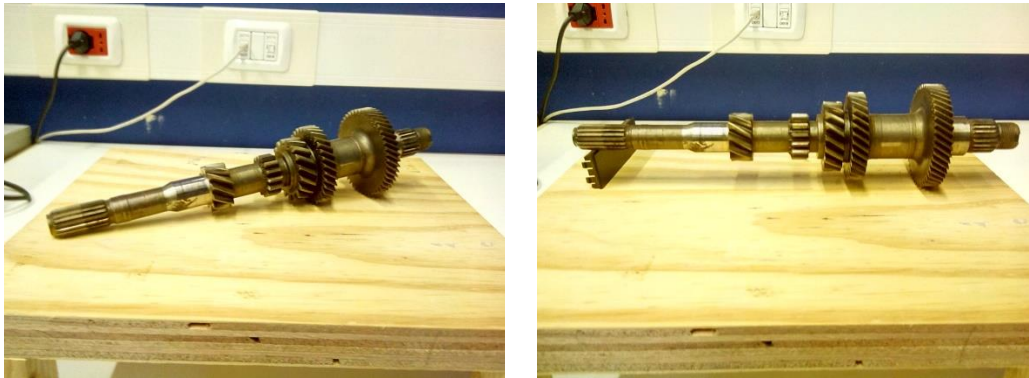


Fig.4.3 Albero a ingranaggi.

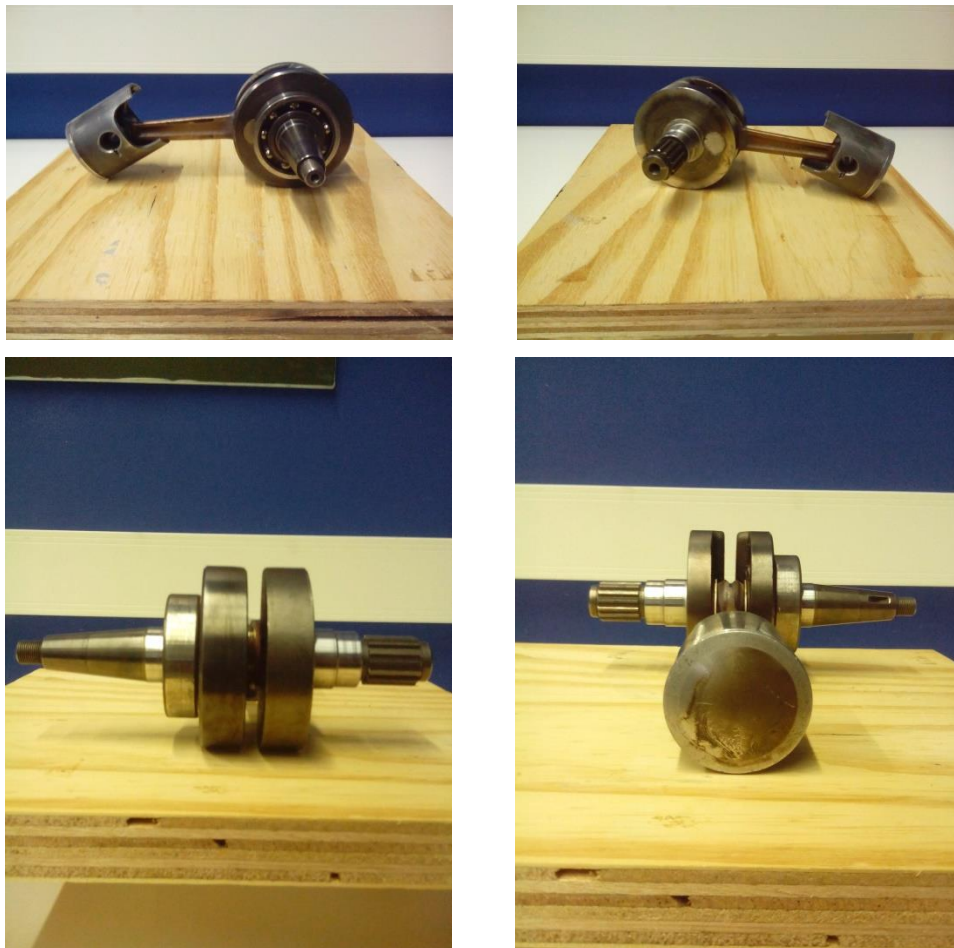


Fig. 4.4 Pistone di una moto da corsa 125 cc.

La scelta finale è ricaduta sul pistone di una moto da corsa 125 cc che presenta, anche ad occhio nudo, elevata usura e ossidazione (elementi rilevanti per la possibile presenza di cricche e/o difetti superficiali/sub-superficiali).

Albero motore 1900 JTD costituito da parti in acciaio e gomiti in ghisa²⁵, scartato in quanto questa sua natura composita avrebbe arrecato diversi problemi inerenti l'impostazione di alcuni parametri fondamentali della termocamera, come ad esempio l'emissività relativa delle varie parti e la temperatura riflessa. L'albero ad ingranaggi è stato scartato per le dimensioni dei particolari troppo ridotte: ipotizzando prove termografiche non si sarebbero potute individuare eventuali cricche e difetti perché troppo piccoli (le termocamere, come descritto in precedenza, non sono dotate di zoom per questo uso sarebbe necessaria una termocamera con elevato IFOV).

L'indagine termografica è stata suddivisa in diverse campagne d'ispezione in cui la temperatura del forno è stata impostata e mantenuta costante a 70 °C. Le diverse prove sono state, quindi, effettuate riscaldando il componente con la medesima sollecitazione, ma con differenti intervalli di tempo:

- 1 minuto (60 s);
- 2 minuti (120 s);
- 3 minuti (180 s);

durante le tre prove, le immagini termiche sono state acquisite subito dopo la sollecitazione (al tempo t_0), con un intervallo di tempo Δt di due minuti per i primi casi e di quattro minuti per i successivi in modo tale da riuscire a monitorare il decadimento della temperatura fino a quindici minuti dopo la stimolazione termica. Si riportano, di seguito, delle tabelle riguardanti le prove effettuate, in modo da espletare la metodologia di acquisizione:

| PROVE DIMOSTRATIVE A DISTANZA RAVVICINATA: PISTONE SOLLECITATO 60 s – 120 s – 180 s | | | | | |
|--|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| MODALITA' | INTERVALLI DI TEMPO | | | | |
| | t_0 | t_0+2 | t_0+4 | t_0+8 | t_0+15 |
| Super-risoluzione attiva a mano libera | 4 sezioni del pistone | 4 sezioni del pistone | 4 sezioni del pistone | 4 sezioni del pistone | 4 sezioni del pistone |

²⁵ I primi alberi motori presentavano parti in ghisa, successivamente sostituite da elementi in acciaio man mano che le richieste di velocità elevate aumentavano.

Queste prove sono necessarie per verificare la presenza di cricche o difetti e, di conseguenza, concentrarsi sulle parti interessate. Individuate tali sezioni le immagini termografiche sono state acquisite con gli stessi intervalli di tempo delle prove effettuate a distanza ravvicinata ponendosi, inizialmente, a una distanza di un metro dall'oggetto da indagare e, successivamente, aumentando di prova in prova tale lunghezza di un Δl pari a 50 cm fino a raggiungere la distanza ultima di quattro metri.

| PROVE ALLA DISTANZA DI 1 - 4 m ($\Delta l = 50$ cm): | | | | | |
|--|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| PISTONE SOLLECITATO 60 s – 120 s - 180 s | | | | | |
| MODALITA' | INTERVALLI DI TEMPO | | | | |
| | t_0 | t_0+2 | t_0+4 | t_0+8 | t_0+15 |
| Super-risoluzione attiva su cavalletto | sezioni di rilievo | sezioni di rilievo | sezioni di rilievo | sezioni di rilievo | sezioni di rilievo |
| Super-risoluzione attiva a mano libera | sezioni di rilievo | sezioni di rilievo | sezioni di rilievo | sezioni di rilievo | sezioni di rilievo |
| Risoluzione max sensore (320x240) su cavalletto | sezioni di rilievo | sezioni di rilievo | sezioni di rilievo | sezioni di rilievo | sezioni di rilievo |
| Risoluzione max sensore (320x240) su cavalletto | sezioni di rilievo | sezioni di rilievo | sezioni di rilievo | sezioni di rilievo | sezioni di rilievo |

Dopo aver stilato il progetto diagnostico, sono stati stabiliti i settaggi dei vari parametri fondamentali della termocamera (vedi paragrafo 2.4): emissività, temperatura e umidità ambientale, temperatura riflessa, *range* di temperatura. Per quanto riguarda l'emissività, trattandosi di un oggetto in acciaio usurato e ossidato si è impostato un valore pari a 0.79 così come indicato in tabella.

| Material (material temperature) | Emissivity |
|--------------------------------------|------------|
| Aluminium, bright rolled (170 °C) | 0.04 |
| Cotton (20 °C) | 0.77 |
| Concrete (25 °C) | 0.93 |
| Ice, smooth (0 °C) | 0.97 |
| Iron, emery ground (20 °C) | 0.24 |
| Iron with casting skin (100 °C) | 0.80 |
| Iron with rolling skin (20 °C) | 0.77 |
| Gypsum (20 °C) | 0.90 |
| Glass (90 °C) | 0.94 |
| Rubber, hard (23 °C) | 0.94 |
| Rubber, soft grey (23 °C) | 0.89 |
| Wood (70 °C) | 0.94 |
| Cork (20) | 0.70 |
| Radiator, black anodised (50 °C) | 0.98 |
| Copper, slightly tarnished (20 °C) | 0.04 |
| Copper, oxidized (130°C) | 0.76 |
| Plastics: PE, PP, PVC (20 °C) | 0.94 |
| Brass, oxidized (200°C) | 0.61 |
| Paper (20 °C) | 0.97 |
| Porcelain (20 °C) | 0.92 |
| Black paint, matt (80 °C) | 0.97 |
| Steel, heat-treated surface (200 °C) | 0.52 |
| Steel, oxidized (200) | 0.79 |
| Clay, burnt (70 °C) | 0.91 |
| Transformer paint (70 °C) | 0.94 |
| Brick, mortar, plaster (20 °C) | 0.93 |

Fig. 4.5 Tabella emissività [11].

Le misure della temperatura e di umidità ambientale sono state realizzate mediante un termoigrometro e impostate rispettivamente ai valori di 20 °C e 50%.

Il valore della temperatura riflessa, dopo che sono state prese le dovute precauzioni per schermare le sorgenti di elevata radiazione presenti nel Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale, è stato impostato pari a 22 °C, qualche grado in più rispetto a quello della temperatura ambientale. Il range di temperatura impostato va da 15 °C (valore che si discosta di qualche grado dalla temperatura del pistone freddo: 17 °C ricavata tramite termometro a contatto), ad una temperatura di poco superiore alla temperatura del forno pari a 80 °C.

Durante la visualizzazione di alcuni termogrammi di prova mediante software²⁶, quest'ultimo valore è stato ridotto a 40 °C in modo tale da ottenere immagini più nitide; quindi il *range* di temperatura sarà uguale a 15 – 40 °C.

4.1 PROVE DIMOSTRATIVE A DISTANZA RAVVICINATA

In queste prime battute termografiche si è scelto di scattare le immagini a distanza ravvicinata e con *super-resolution* attiva per individuare possibili difetti, anche di dimensioni ridotte, registrando quattro sezioni differenti del pistone. Dopo aver attivato il forno elettrico e atteso il tempo necessario per il raggiungimento della temperatura impostata sul quadro analogico (70 °C), è stato inserito al suo interno il componente selezionato e sollecitato per 60 s nella prima prova, 120 s nella seconda e 180 s nella terza.

Sono proposti di seguito i termogrammi di maggiore interesse per l'identificazione di cricche e difetti, relativi alla sollecitazione di 120 s. Le immagini corrispondenti le prove effettuate con periodi di sollecitazione di 60 s e 180 s sono presentati in Appendice.

²⁶ Software: Testo IRSoft.

PROVA DIMOSTRATIVA: SEZIONE A, SOLLECITAZIONE 120 s

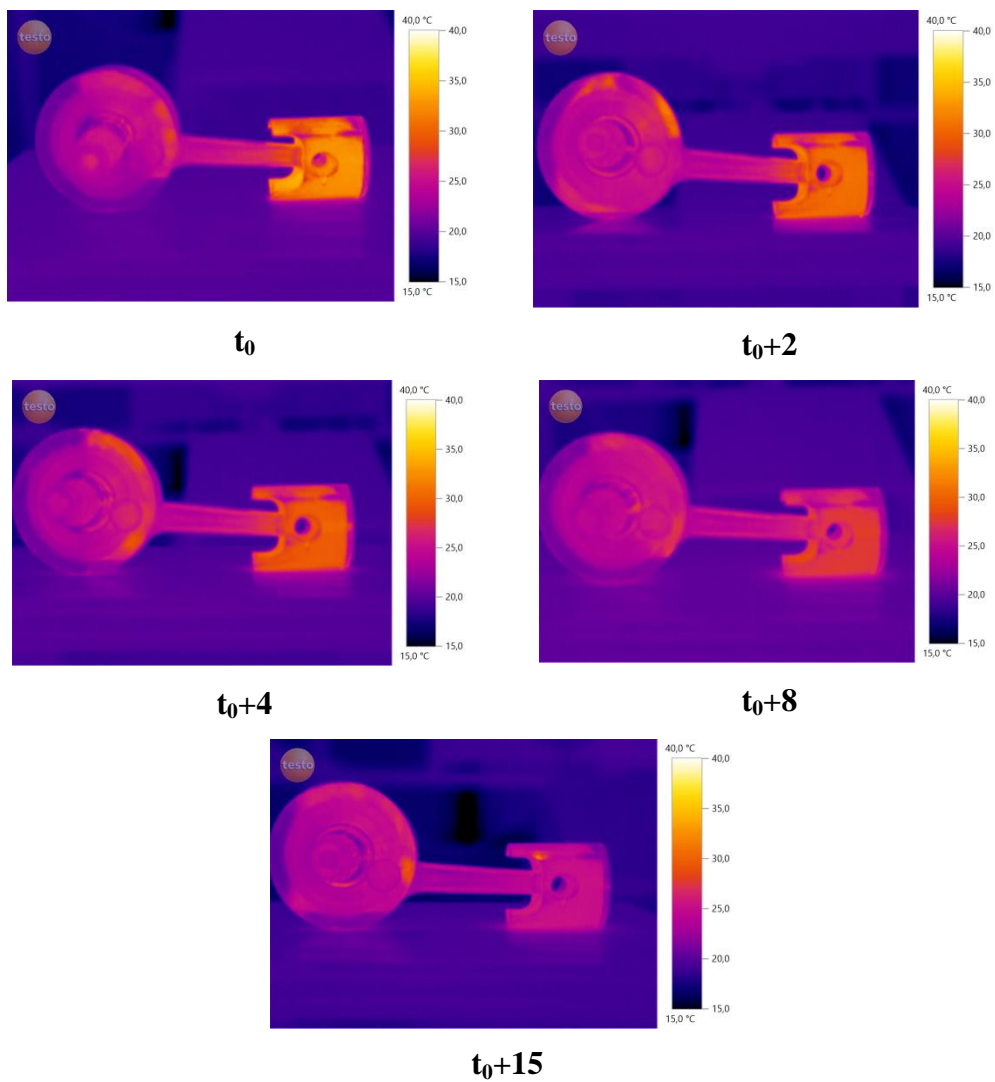


Fig. 4.6 Sezione A del pistone sollecitato 120 s.

Per visualizzare maggiori differenze tra le diverse immagini sono riportate con la modalità “palette” impostata su ferro e la scala termica come riferimento.

PROVA DIMOSTRATIVA: SEZIONE B, SOLLECITAZIONE 120 s

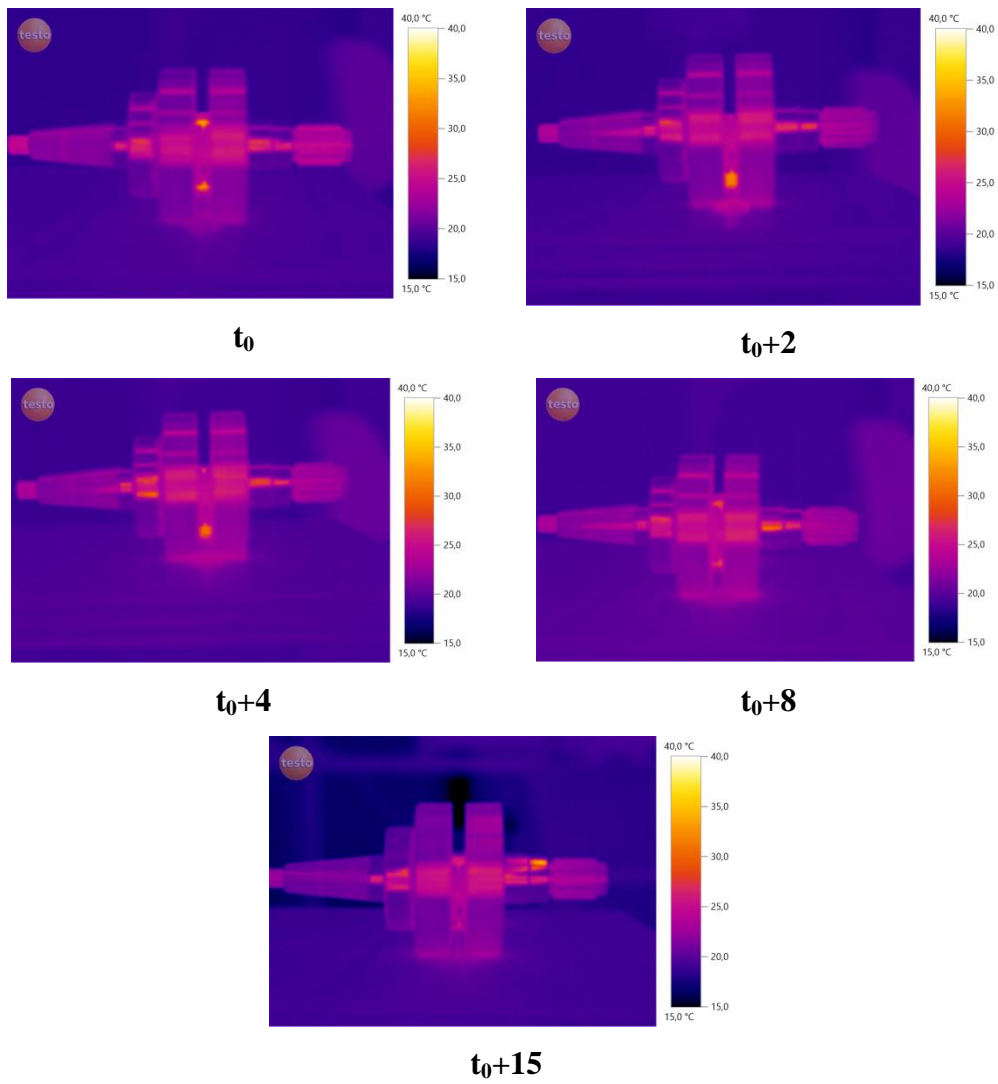


Fig. 4.7 Sezione B del pistone sollecitato 120 s.

PROVA DIMOSTRATIVA: SEZIONE C, SOLLECITAZIONE 120 s

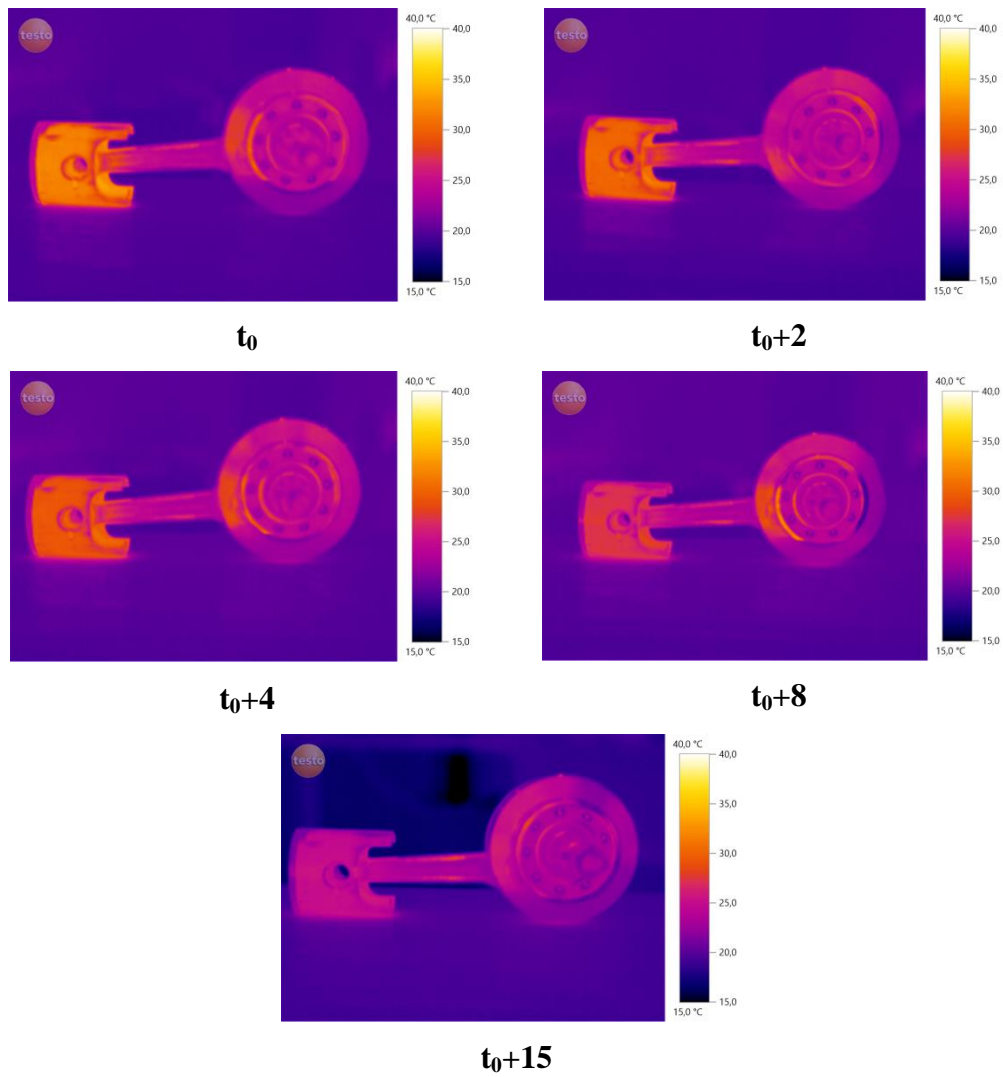


Fig. 4.8 Sezione C del pistone sollecitato 120 s.

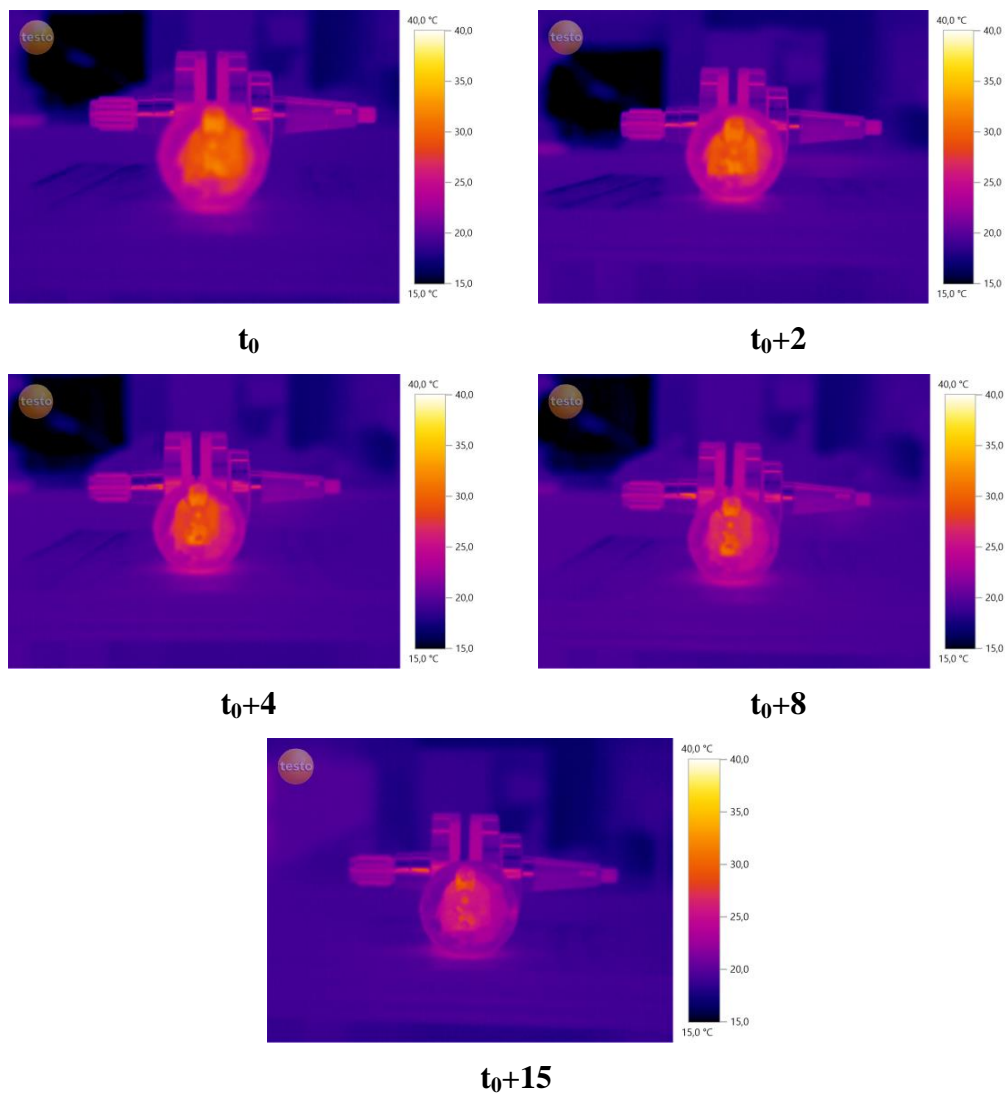
PROVA DIMOSTRATIVA: SEZIONE D, SOLLECITAZIONE 120 s

Fig. 4.9 Sezione D del pistone sollecitato 120 s.

Per il pistone, stimolato termicamente per sessanta secondi, non sono stati rilevati i termogrammi a t_0+15 in quanto già a t_0+8 le temperature si avvicinavano, abbastanza, alla temperatura iniziale del pistone freddo: temperatura massima a t_0 circa 29 °C, temperatura massima a t_0+8 circa 20 °C. Grazie a queste prime prove si è riusciti ad individuare le parti del componente maggiormente sollecitate, che presentavano una distribuzione di temperatura superficiale non uniforme. Si osservino i picchi di temperatura, che possono indicare la presenza di difetti. Nel pezzo non sono state individuate cricche evidenti, bensì risalta subito all'occhio come l'usura del pistone e la presenza di ossidazioni sia causa di elevata temperatura delle parti interessate come mostrato nelle seguenti immagini.

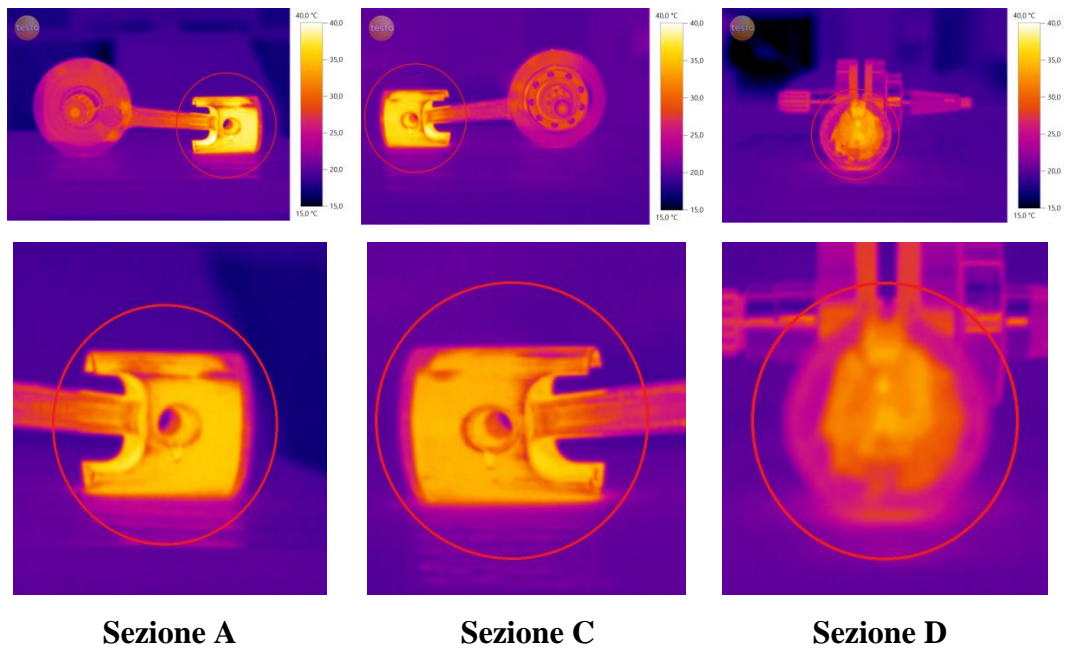


Fig. 4.10 Dettagli del pistone interessati da una maggiore concentrazione di temperatura.



Fig. 4.11 Fotografia digitale sezione A.



Fig. 4.12 Fotografia digitale sezione C.

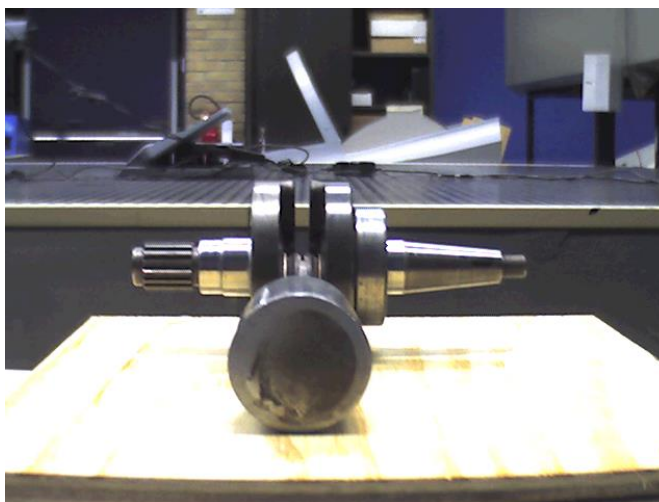


Fig. 4.13 Fotografia digitale sezione D.

Da queste ultime immagini si nota come l'imperfezione presente sulla sezione D è la stessa che si trova sulle sezioni A e C e determina una distribuzione di temperatura caratteristica (le parti usurate hanno temperature superiori rispetto quelle non usurate, si veda Fig. 4.10 Sezione A, Sezione D). Di conseguenza, si sono concentrate le prove termografiche concentrandosi sulle sezioni C e D (parti interessate da maggiore usura).

Successivamente la stimolazione termica di 60 s è stata scartata poiché in questo breve lasso di tempo il componente non raggiunge temperature considerevoli. Si è scelto, pertanto, di continuare l'indagine riscaldando il pistone per 120 s: periodo di tempo con il quale si ottiene la sollecitazione termica ottimale per registrare il completo e corretto decadimento della temperatura superficiale.

Con la stimolazione di 180 s, il componente, anche dopo il massimo intervallo di tempo (quindici minuti) presenta temperature “troppo” elevate (circa 30.5 °C) rispetto al componente freddo.

4.2 ANALISI DEI RISULTATI

Una volta identificate le sezioni di maggiore interesse (C e D), prima di iniziare con le rilevazioni termografiche si è provveduto a sistemare l'intera strumentazione.



Fig. 4.14 Posizionamento della strumentazione.

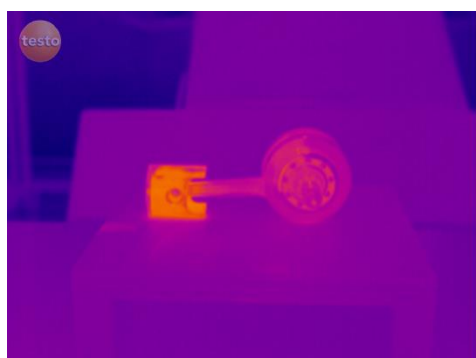
Le immagini termografiche sono state acquisite con gli stessi intervalli di tempo delle prove dimostrative, ponendosi però, inizialmente, alla distanza di un metro dall'oggetto da indagare.

A questo punto si è portato a temperatura il forno elettrico e introdotto il pistone per il periodo di 120 s. Dopo la sollecitazione, aiutandosi con dei guanti tecnici, è stato posizionato il pistone sul piano di lavoro e si è proceduto ad acquisire i vari termogrammi, facendo uso di diverse modalità di ripresa. Di seguito si riportano i risultati necessari al confronto tra le varie tecniche di acquisizione:

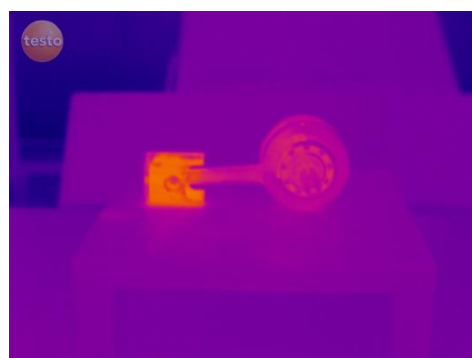
- **Super-risoluzione attiva**²⁷ con termocamera montata sul dispositivo di micro - movimentazione (gioco del dispositivo 0.7 cm) e fissata **su cavalletto**;
- **Super-risoluzione attiva a mano libera**;
- **Risoluzione massima del sensore**²⁸ con termocamera montata sul dispositivo di micro - movimentazione (gioco del dispositivo 0 cm) e fissata **su cavalletto**;
- **Risoluzione massima del sensore a mano libera**.

SEZIONE C DEL PISTONE ALLA DISTANZA DI UN METRO

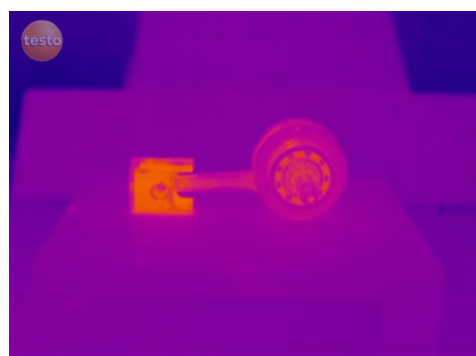
Sono presentati i risultati acquisiti a t_0 e t_0+15 (i due intervalli estremi) in modo da riuscire a confrontare i termogrammi più rilevanti per la visualizzazione del decadimento della temperatura.



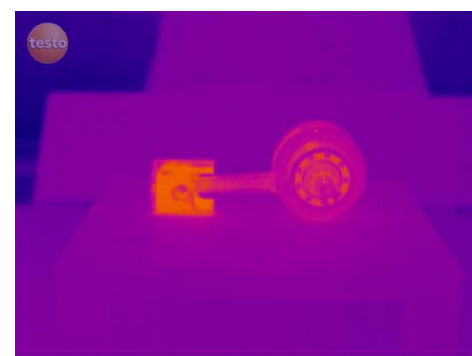
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera



RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



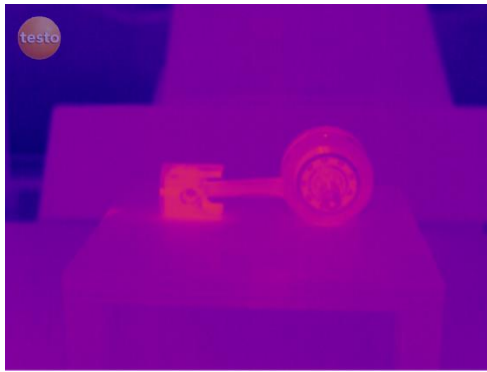
RIS. MAX a mano libera

Fig. 4.15 Sezione C sollecitata 120 s; immagini a t_0 .

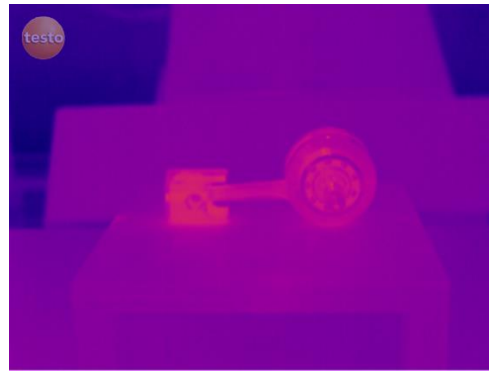
Dove: S – R = super-risoluzione; RIS. MAX = risoluzione massima sensore; G_d = gioco del dispositivo di micro – movimentazione.

²⁷ Risoluzione: 640x480.

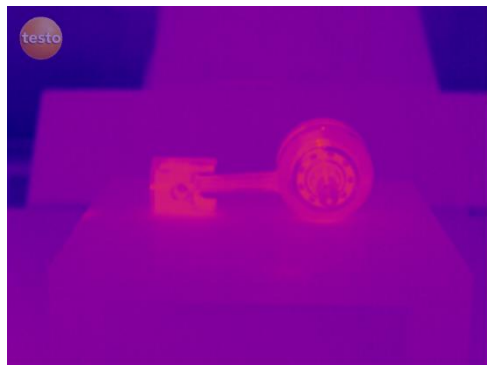
²⁸ Risoluzione: 320x240.



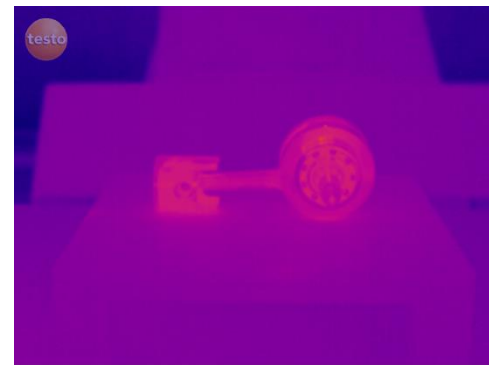
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera



RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



RIS. MAX a mano libera

Fig. 4.16 Sezione C sollecitata 120 s; immagini a t_0+15 .

Alla distanza di un metro le immagini acquisite con la tecnica della super-risoluzione attiva, risultano in entrambi i casi (termocamera fissata su cavalletto e a mano libera) ben dettagliate e nitide, senza mostrare differenze evidenti.

I termogrammi scattati alla risoluzione di 320x240 (LR) appaiono ugualmente ben definiti anche se mostrano una minima riduzione della nitidezza.

SEZIONE D DEL PISTONE ALLA DISTANZA DI UN METRO

Anche in questo caso, come nei successivi, verranno riportate le immagini termiche relative alle acquisizioni effettuate a t_0 e t_0+15 .

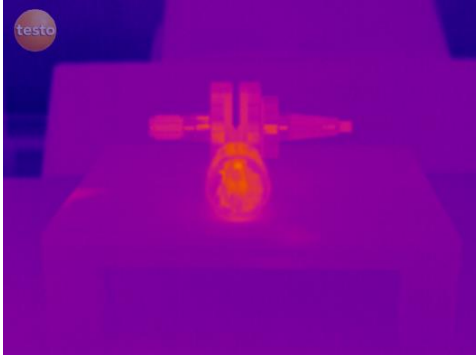
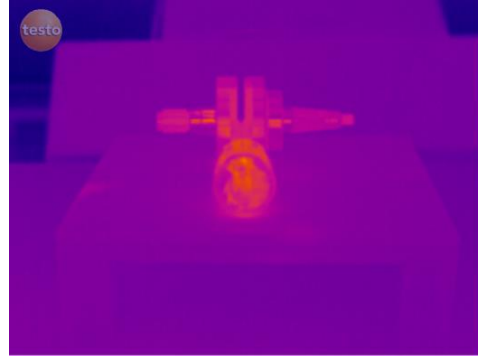
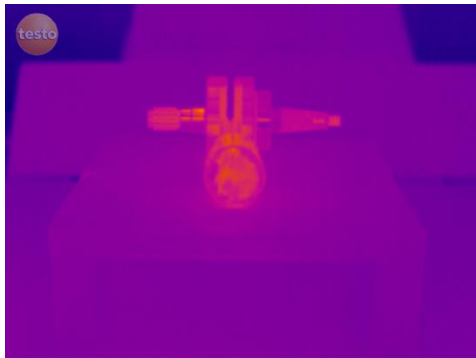
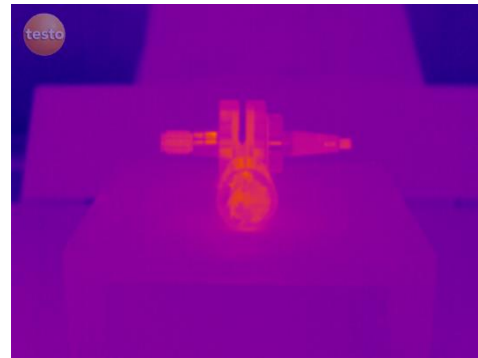
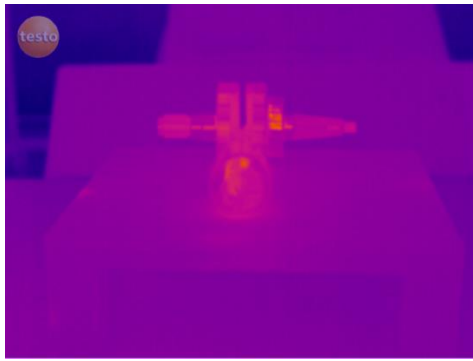
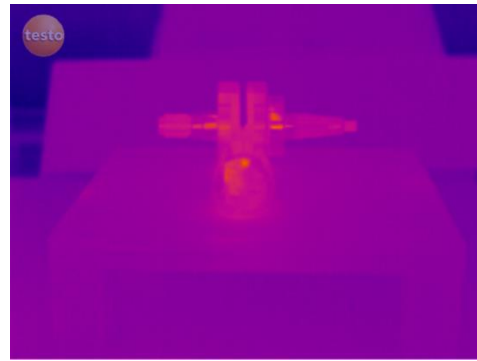
**S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)****S – R a mano libera****RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)****RIS. MAX a mano libera**

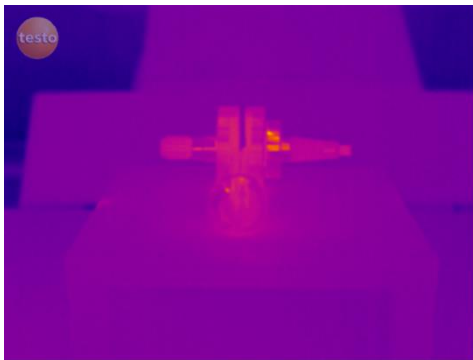
Fig. 4.17 Sezione D sollecitata 120 s; immagini a t_0 .



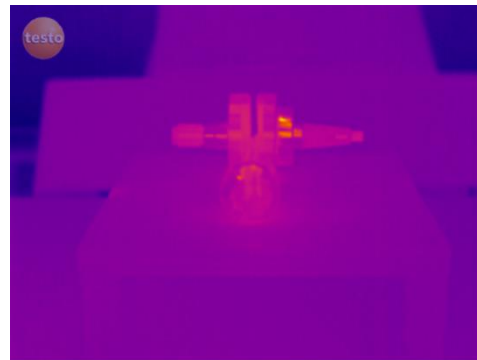
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera



RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



RIS. MAX a mano libera

Fig. 4.18 Sezione D sollecitata 120 s; immagini a t_0+15 .

Come nel caso precedente, dato che la distanza è la medesima, non si presentano differenze palesi tra le diverse modalità di ripresa a parte una minore nitidezza negli scatti ottenuti senza l'uso della *super-resolution*.

Da queste prove si evince come i risultati ottenuti a t_0 , t_0+2 e t_0+4 siano molto simili. Quindi si è scelto di modificare l'intervallo di tempo tra due rilevazioni (Δt) a cinque minuti e, di conseguenza, acquisire immagini a t_0 , t_0+5 , t_0+10 e t_0+15 , aumentando in ogni prova la distanza dal pistone di Δl ($= 50$ cm) fino alla distanza massima di quattro metri.

Le immagini relative alle prove compiute alle distanze di 1.50 - 2 - 2.50 metri non mostrando evidenti scostamenti dai rilevamenti finora palesati, sono state appositamente tralasciate perché non rilevanti. Maggiori dettagli verranno illustrati in Appendice.

A seguire si propongono le prove relative alle distanze maggiori e uguali di 3 m, con il componente sollecitato termicamente per due minuti; si iniziano a osservare alcune difformità tra le immagini termiche acquisite con le differenti tecniche.

Ad esempio alla distanza di tre metri, per entrambe le sezioni (C e D), si può notare come, con il decadimento della temperatura (massimo intervallo di tempo dalla sollecitazione), il termogramma scattato sfruttando la super-risoluzione con la termocamera posizionata sul dispositivo di micro – movimentazione e fissata al cavalletto risulta più dettagliato e nitido rispetto alle altre modalità di acquisizione. In particolare si nota che rispetto alle immagini acquisite alla massima risoluzione del sensore (320x240) appare, in tutte le casistiche valutate, di qualità superiore per un netto miglioramento della nitidezza del termogramma e per i maggiori dettagli evidenziati.

Confrontando, invece, le immagini termiche scattate in modalità *super-resolution* attiva su cavalletto e a mano libera, in alcuni casi, l'uso del cavalletto contribuisce all'incremento della risoluzione del termogramma migliorando la risposta finale di quei complessi algoritmi che regolano l'innovativa tecnica della super-risoluzione. Questo incremento è legato soprattutto all'ottimizzazione che si ha, grazie all'uso del cavalletto, del metodo di registrazione della messa a fuoco: i movimenti della termocamera sono limitati, mentre utilizzando l'apparecchiatura a mano libera il tremolio dell'operatore può compromettere tale operazione.

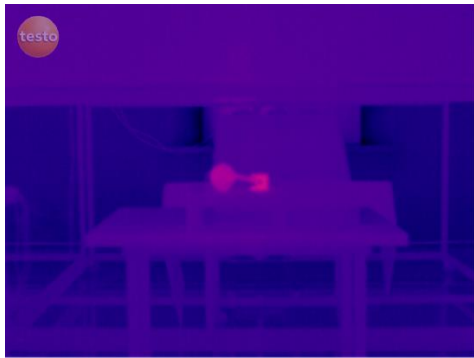
SEZIONE C DEL PISTONE ALLA DISTANZA DI TRE METRI



S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera



RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)

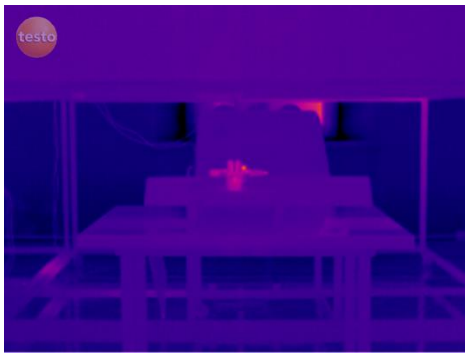
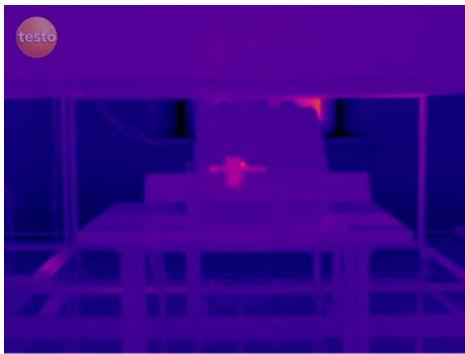
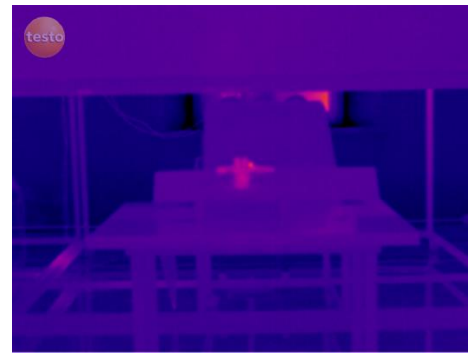


RIS. MAX a mano libera

Fig. 4.19 Sezione C sollecitata 2min; immagini a t_0+15 min.

Si iniziano a notare le prime differenze tra l'immagine termica ottenuta con *super-resolution* attiva a cavalletto e a mano libera.

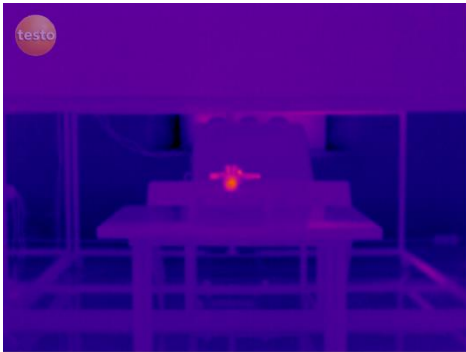
SEZIONE D DEL PISTONE ALLA DISTANZA DI TRE METRI

**S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)****S – R a mano libera****RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)****RIS. MAX a mano libera***Fig. 4.20 Sezione D sollecitata 120 s; immagini a $t_0 + 15$ min.*

Man mano che ci si allontana dal componente è possibile osservare differenze sempre più evidenti tra i diversi termogrammi e, come precedentemente sottolineato, risaltate soprattutto dal decadimento della temperatura superficiale.

A tal proposito si propongono le immagini termiche relative alla sezione D del pistone, realizzate alla distanza di 3.50 m dal componente e ai tempi di acquisizione t_0 e $t_0 + 15$.

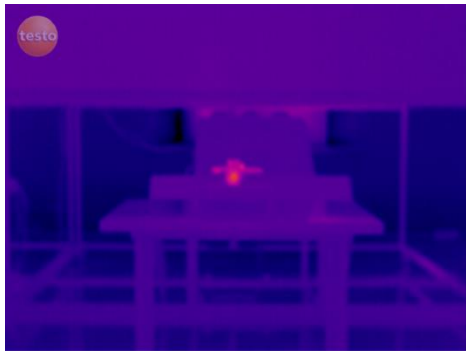
SEZIONE D DEL PISTONE ALLA DISTANZA TRE METRI E MEZZO



S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

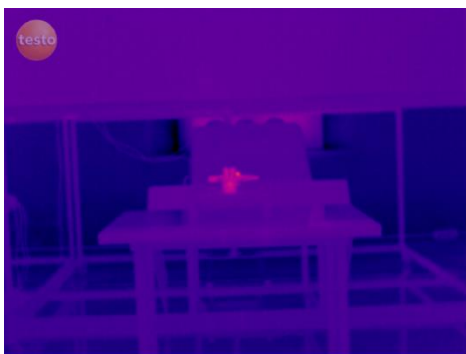


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



RIS. MAX a mano libera

Fig. 4.21 Sezione D sollecitata 120 s; immagini a t_0 .



S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera



RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)

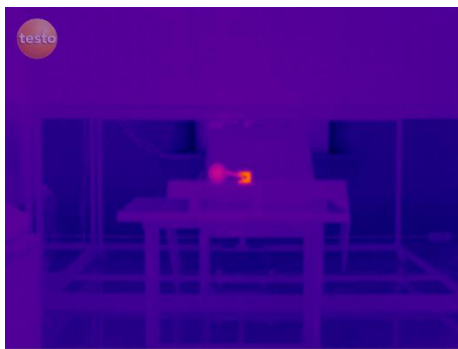


RIS. MAX a mano libera

Fig. 4.22 Sezione D sollecitata 120 s; immagini a $t_0 + 15$ min.

Spostandoci, infine, alla distanza di quattro metri, il miglioramento di risoluzione del termogramma ottenuto con l'opzione *super-resolution* attiva e con la termocamera montata al dispositivo di micro – movimentazione, fissato al cavalletto, è evidente anche a temperature “elevate” (nelle acquisizioni a t_0). L'immagine oltre ad essere più nitida delle altre, mostra, ancora, diversi dettagli non visibili con le altre modalità di ripresa; come è possibile apprezzare nelle Fig. 4.23 – 4.24.

SEZIONE C DEL PISTONE ALLA DISTANZA DI 4 METRI



S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera



RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



RIS. MAX a mano libera

Fig. 4.23 Sezione C sollecitata 120 s; immagini a t_0 .



S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera



RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



RIS. MAX a mano libera

Fig. 4.24 Sezione C sollecitata 120 s; immagini a t_0+15 min.

Dopo aver condotto questa campagna di riprese termografiche di natura sperimentale, i risultati ottenuti, oltre a dimostrare i comprovati miglioramenti ottenuti mediante l'uso della tecnica di super-risoluzione adottata dalla ditta Testo Spa (e non solo), palesano l'efficacia del dispositivo di micro – movimentazione. Il suo utilizzo infatti, durante una battuta termografica in campo industriale, fornisce “indirettamente”²⁹ un ulteriore incremento alla tecnica della super-risoluzione, come dimostrato in questo lavoro di tesi. Fatto significativo è rappresentato dai risultati migliori conseguiti nella modalità di utilizzo a cavalletto con il dispositivo di micro – movimentazione rispetto alla modalità a mano libera. Nei casi in cui non si ha un vantaggio evidente, i risultati sono sempre simili e comparabili.

²⁹ Non si ottiene una modifica della super-risoluzione o degli algoritmi che la regolano; si ottimizza la tecnica di registrazione della messa a fuoco, ottenendo così un perfezionamento nell'acquisizione dell'immagine.

5 CONCLUSIONI

In questo elaborato ci si è posti come obiettivo lo studio ed il confronto delle diverse tecniche termografiche innovative presentate, adottate per un'indagine termografica in campo industriale. Tramite l'analisi dei risultati si nota immediatamente come, con il decadimento della temperatura e con l'aumentare della distanza di acquisizione dell'oggetto indagato, non siano identificabili evidenti cricche e/o difetti; si possono, però, apprezzare le differenze tra le immagini termografiche conseguite mediante le diverse tecniche di acquisizione:

- Super-risoluzione attiva con termocamera montata sul dispositivo di micro - movimentazione (gioco del dispositivo 0.7 cm) e fissata su cavalletto fotografico (1);
- Super-risoluzione attiva a mano libera (2);
- Risoluzione massima del sensore con termocamera montata sul dispositivo di micro - movimentazione (gioco del dispositivo 0 cm) e fissata su cavalletto fotografico (3);
- Risoluzione massima del sensore a mano libera (4).

Tali differenze cominciano ad essere osservabili a partire dalla distanza di tre metri ed aumentano con l'aumentare della distanza dal componente; spiccano inoltre, in maniera maggiore, quando la temperatura diminuisce. Le immagini acquisite con la tecnica della super-risoluzione attiva (1) e (2) risultano in tutti i casi considerati, più dettagliate e più nitide rispetto quelle registrate alla risoluzione massima del sensore (320x240) (3) e (4).

Confrontando le immagini (1) e (2) relative alle diverse prove effettuate, si nota come in alcuni casi il termogramma (1), ottenuto con l'opzione super-risoluzione attiva, con la termocamera montata sul dispositivo di micro – movimentazione e fissata al cavalletto, risulti rispetto al (2) (super-risoluzione attiva ma con termocamera utilizzata a mano libera) più nitido come illustrato anche in [12].

Ciò è legato soprattutto al metodo di registrazione della messa a fuoco: attraverso l'uso della termocamera fissata al cavalletto tale funzione risulta più accurata e precisa rispetto al caso in cui la registrazione avvenga a mano libera. Altro motivo di tale differenza è che spesso le movimentazioni involontarie della mano

dell'operatore sono fin troppo accentuate, riducendo così la risoluzione massima ottenibile. Utilizzando il dispositivo di micro – movimentazione, invece, i movimenti della termocamera sono ridotti rispetto all'uso a mano libera, migliorando, quindi sia l'operazione di messa a fuoco che la ripresa finale, eliminando così i difetti legati ai movimenti bruschi dell'operatore, i quali tendono a “trarre in inganno” l'algoritmo ricostruttivo dell'immagine ad alta risoluzione. Indi per cui, vi saranno alcune immagini (1) di qualità maggiore rispetto ad altre (2) e altri casi in cui tali termogrammi appaiono molto simili, se non uguali.

Comunque i miglioramenti apportati dalla tecnica della super-risoluzione risultano essere abbastanza evidenti sia che si lavori a mano libera, che con termocamera fissata ad un cavalletto fotografico (sempre utilizzando il dispositivo di micro – movimentazione della termocamera, altrimenti la super-risoluzione non sarebbe sfruttabile).

Questo induce a pensare, per possibili sviluppi futuri, di poter usufruire della tecnica della super-risoluzione, con la termocamera montata al dispositivo di micro – movimentazione e fissata ad un cavalletto fotografico, non solo per ottenere immagini termografiche georeferenziate in campo architettonico, ma anche per assicurarsi risultati sempre più precisi in campo industriale, dove gli oggetti considerati risultano di dimensioni ridotte (anche di molto) rispetto a intere superfici indagabili in campo architettonico. Si può inoltre pensare, come proposto in [12], di poter realizzare un prototipo di tale dispositivo in lega metallica, in modo tale da limitare i difetti degli attuali componenti (elevate componenti flessionali) prodotti in ABS.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Guido Roche, 2012, *La termografia per l'edilizia e l'industria. Manuale operativo per le verifiche termografiche*, Maggioli Editore;
- [2] FLIR, September 21, 2009, *Manuale dell'utente, FLIR Reporter*, Versione 8.5, Publ. No. 1558577 Rev. A401 – ITALIAN (IT) ([http://support.flir.com/DocDownload/Assets/46/Italian/1558577\\$a401.pdf](http://support.flir.com/DocDownload/Assets/46/Italian/1558577$a401.pdf));
- [3] X. Maldague, *Introduction to NDT by Active Infrared Thermography*, Electrical and Computing Engineering Department, Université Laval, Quebec City (Que.) Canada;
- [4] Brent Griffith, Daniel Türler, Howdy Goudey, July 27, 2001, *Infrared Thermographic Systems*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley CA;
- [5] Herbert Kaplan, January 01, 2007, *Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment*, SPIE Press;
- [6] Thomas Luhmann, Julia Ohm, Johannes Piechel, Thorsten Roelfs, *Geometric Calibration of Thermographic Cameras*, Institute for Applied Photogrammetry and Geoinformatics, Jade University of Applied Sciences Oldenburg, Germany, pp. 411-416;
- [7] Roger Y.Tsai, 1987, *A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-The-Shelf TV Cameras And Lenses*, IEEE Journal Of Robotics And Automation, Vol. RA-3, No.4, pp. 323-344;
- [8] Janne Heikkilä, Olli Silvén, *A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction*, Infotech Oulu and Departement of Electrical Engineering, University of Oulu, Finland;
- [9] Carlo Santulli, *Uso della Termografia per Valutare il Danneggiamento Dopo Impatto di Compositi e Componenti Automobilistici*, School of Construction Management and Engineering, University of Reading – UK;
- [10] Testo Spa, Settembre 2008, *Guida Tascabile Sulla Termografia*, consultare sito www.testo.it;
- [11] Testo Spa, *Testo 882- Thermal Imager, Instruction Manual*, consultare sito www.testo.it;

BIBLIOGRAFIA

- [12] Andrea Vasini, 2012, *Utilizzo della tecnica della super-risoluzione per migliorare la qualità delle immagini di una termocamera all'infrarosso: studio ed ottimizzazione della metodologia*, Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, Seconda Facoltà di Ingegneria con Sede a Cesena (nuova Scuola di Ingegneria e Architettura);
- [13] Testo Spa, 2012, *Testo SuperResolution- the patent-pending technology for high-resolution thermal images*, Professional article- background article: si veda www.testosites.de;
- [14] Takahide Sakagami, Tomohiro Matsumoto, Shiro Kubo, *Nondestructive Testing by Super-Resolution Infrared Thermography*, Graduate School of Engineering, Osaka University.

REFERENCES FIGURE

CAP. 1 LA TERMOGRAFIA E LE INDAGINI NON DISTRUTTIVE

- Fig. 1.1: <http://www.pce-italia.it/html/dati-tecnici-1/termocamera-s80hf.htm>;
- Fig. 1.2: <http://www.naturaltech.it/Termografia.htm>;
- Fig. 1.3: http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic_classroom/ir_tutorial/discovery.html;
- Fig. 1.4: <http://www.orden-pourlemerite.de/mitglieder/macedonio-melloni?m=3&u=1>;
- Fig. 1.5: http://it.wikipedia.org/wiki/Leopoldo_Nobili;
- Fig. 1.6: http://it.wikipedia.org/wiki/John_Herschel;
- Fig. 1.6: <http://aviation-history.com/early/langley.htm>;
- Fig. 1.6: <http://www.museodifisica.unitn.it/?id=414>;
- Fig. 1.7: <http://www.undiscoveredscotland.co.uk/usbiography/d/jamesdewar.html>;
- Fig. 1.8: http://www.negozispay.com/1/visore_notturmo_viking_1910601.html;
- Fig. 1.8: <http://premierepro.net/templates/night-vision-binoculars-hud/>;
- Fig. 1.9: http://www.videosorveglianzaonline.com/telecamere_videosorveglianza_per_esterni.htm;
- Fig. 1.10: http://www.windoweb.it/guida/scienze/biografia_max_planck.htm;
- Fig. 1.11: <http://science.unitn.it/~dalfovo/boltzmann/capitoli/fatti.html>;
- Fig. 1.12: http://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Wien;
- Fig. 1.13: <http://claesjohnson.blogspot.it/2011/11/josef-stefan-backradiation-and-dlr-pure.html>;
- Fig. 1.13: <http://scienceworld.wolfram.com/biography/Boltzmann.html>;

CAP.2 LA TERMOCAMERA

- Fig. 2.1: <http://www.controllitecnologici.com/2013/09/settembre-importanti-novita-da-ortec/>;
- Fig. 2.2: <http://www.messbar.de/testo-8752i-waermebildkamera-komplettest-p-30083.html>;
- Fig. 2.3: <http://www.irpod.net/en/produkte/portable-infrared-thermal-imaging-cameras-nec-avio/nec-thermo-gear-g30-160x120-pixels/>;
- Fig. 2.4: <http://www.cis-italy.com/testo/termocamera-testo-875-876-880-881-882-885-890-termografia-termocamere/882-testo-termocamera/>;
- Fig. 2.5: [http://support.flir.com/DocDownload/Assets/46/Italian/1558571\\$a401.pdf](http://support.flir.com/DocDownload/Assets/46/Italian/1558571$a401.pdf) (vedi pag. 161);

CAP.3 LA TERMOGRAFIA ATTIVA E LA SUPER-RISOLUZIONE

- Fig. 3.1: http://www.visiooimage.com/en/products_ir_ndt_thermography_tutorial.htm;
- Fig. 3.2: http://www.visiooimage.com/fr/products_ir_ndt_thermography_tutorial.htm;
- Fig. 3.3: *Nondestructive Testing by Super-Resolution Infrared Thermography*, Takahide Sakagami, Tomohiro Matsumoto, Shiro Kubo [14];
- Fig. 3.4: *Testo SuperResolution- the patent-pending technology for high-resolution thermal images*, Testo Spa [13];
- Fig. 3.5: *Utilizzo della tecnica della super-risoluzione per migliorare la qualità delle immagini di una termocamera all'infrarosso: studio ed ottimizzazione della metodologia*, Andrea Vasini [12];
- Fig. 3.6: *Nondestructive Testing by Super-Resolution Infrared Thermography*, Takahide Sakagami, Tomohiro Matsumoto, Shiro Kubo [14];
- Fig. 3.7: *Familiarizzazione con sistemi di realta' virtuale, prototipazione rapida ed ingegneria inversa, in dotazione presso il laboratorio di realta' virtuale e simulazione, Relazione di Tirocinio*, Giorgio De Rosa;
- Fig. 3.8: *Utilizzo della tecnica della super-risoluzione per migliorare la qualità delle immagini di una termocamera all'infrarosso: studio ed ottimizzazione della metodologia*, Andrea Vasini [12];
- Fig. 3.9: *Utilizzo della tecnica della super-risoluzione per migliorare la qualità delle immagini di una termocamera all'infrarosso: studio ed ottimizzazione della metodologia*, Andrea Vasini [12];
- Fig. 3.10: *Utilizzo della tecnica della super-risoluzione per migliorare la qualità delle immagini di una termocamera all'infrarosso: studio ed ottimizzazione della metodologia*, Andrea Vasini [12];
- Fig. 3.11: *Utilizzo della tecnica della super-risoluzione per migliorare la qualità delle immagini di una termocamera all'infrarosso: studio ed ottimizzazione della metodologia*, Andrea Vasini [12];
- Fig. 3.12: *Utilizzo della tecnica della super-risoluzione per migliorare la qualità delle immagini di una termocamera all'infrarosso: studio ed ottimizzazione della metodologia*, Andrea Vasini [12];
- Fig. 3.13: *Utilizzo della tecnica della super-risoluzione per migliorare la qualità delle immagini di una termocamera all'infrarosso: studio ed ottimizzazione della metodologia*, Andrea Vasini [12];
- Fig. 3.14: *Utilizzo della tecnica della super-risoluzione per migliorare la qualità delle immagini di una termocamera all'infrarosso: studio ed ottimizzazione della metodologia*, Andrea Vasini [12];

CAP. 4 PROVE SPERIMENTALI

- Fig. 4.1: *Immagine acquisita nel Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale della Scuola di Ingegneria e Architettura con sede a Forlì*;
- Fig. 4.2: *Immagine acquisita nel Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale della Scuola di Ingegneria e Architettura con sede a Forlì*;
- Fig. 4.3: *Immagine acquisita nel Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale*

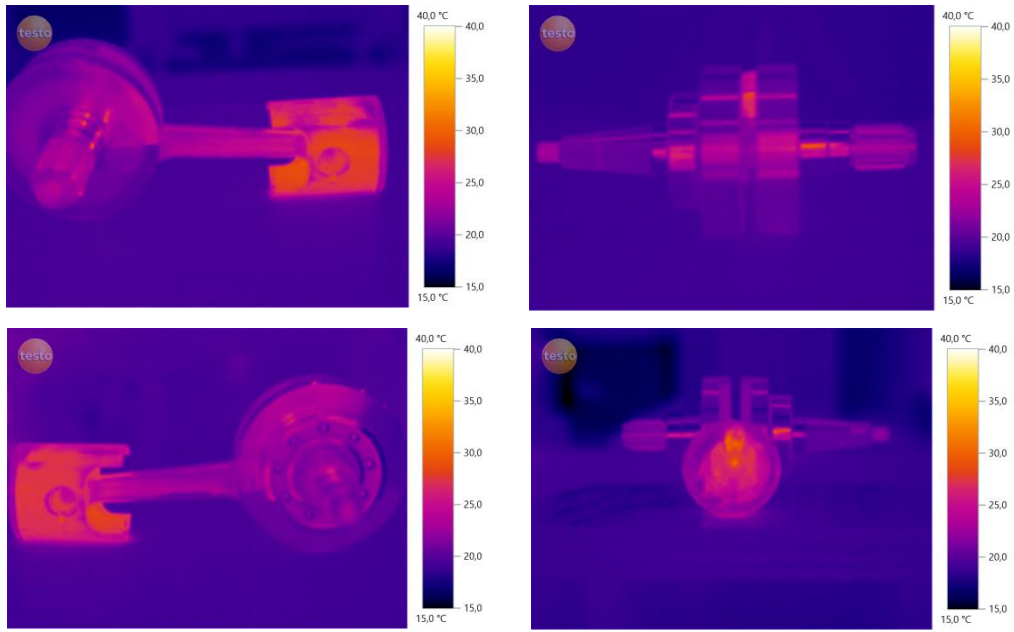
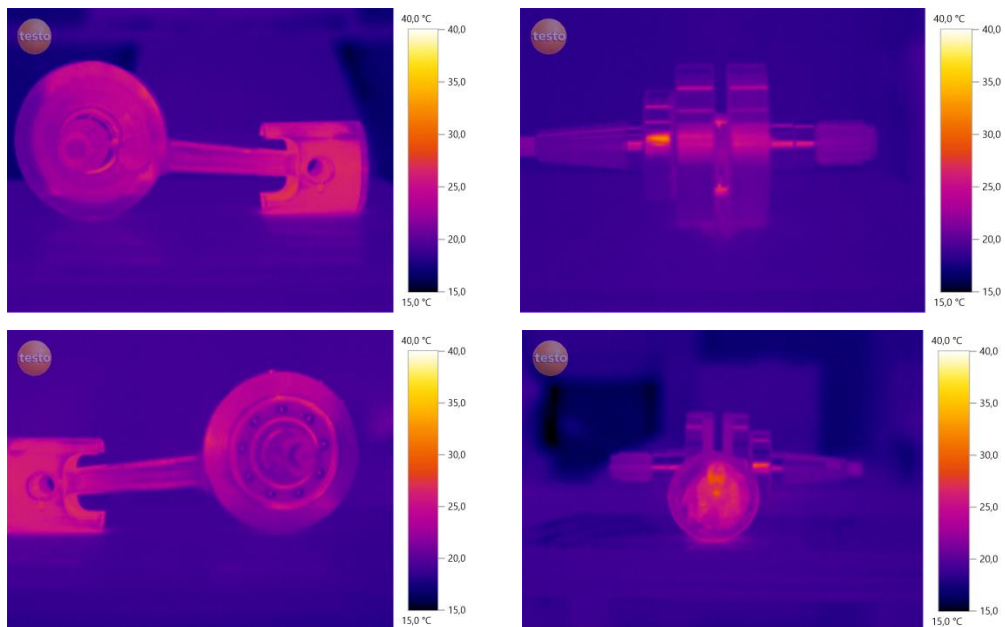
- della Scuola di Ingegneria e Architettura con sede a Forlì;*
- Fig. 4.4: *Immagine acquisita nel Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale della Scuola di Ingegneria e Architettura con sede a Forlì;*
- Fig. 4.5: Testo Spa, Testo 882- Thermal Imager, Instruction Manual, consultare sito www.testo.it;
- Fig. 4.6: *Immagine acquisita nel Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale della Scuola di Ingegneria e Architettura con sede a Forlì;*
- Fig. 4.7: *Immagine acquisita nel Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale della Scuola di Ingegneria e Architettura con sede a Forlì;*
- Fig. 4.8: *Immagine acquisita nel Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale della Scuola di Ingegneria e Architettura con sede a Forlì;*
- Fig. 4.9: *Immagine acquisita nel Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale della Scuola di Ingegneria e Architettura con sede a Forlì;*
- Fig. 4.10: *Immagine acquisita nel Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale della Scuola di Ingegneria e Architettura con sede a Forlì;*
- Fig. 4.11: *Immagine acquisita nel Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale della Scuola di Ingegneria e Architettura con sede a Forlì;*
- Fig. 4.12: *Immagine acquisita nel Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale della Scuola di Ingegneria e Architettura con sede a Forlì;*
- Fig. 4.13: *Immagine acquisita nel Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale della Scuola di Ingegneria e Architettura con sede a Forlì;*
- Fig. 4.14: *Immagine acquisita nel Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale della Scuola di Ingegneria e Architettura con sede a Forlì;*
- Fig. 4.15: *Immagine acquisita nel Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale della Scuola di Ingegneria e Architettura con sede a Forlì;*
- Fig. 4.16: *Immagine acquisita nel Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale della Scuola di Ingegneria e Architettura con sede a Forlì;*
- Fig. 4.17: *Immagine acquisita nel Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale della Scuola di Ingegneria e Architettura con sede a Forlì;*
- Fig. 4.18: *Immagine acquisita nel Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale della Scuola di Ingegneria e Architettura con sede a Forlì;*
- Fig. 4.19: *Immagine acquisita nel Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale della Scuola di Ingegneria e Architettura con sede a Forlì;*
- Fig. 4.20: *Immagine acquisita nel Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale della Scuola di Ingegneria e Architettura con sede a Forlì;*
- Fig. 4.21: *Immagine acquisita nel Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale della Scuola di Ingegneria e Architettura con sede a Forlì;*
- Fig. 4.22: *Immagine acquisita nel Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale della Scuola di Ingegneria e Architettura con sede a Forlì;*
- Fig. 4.23: *Immagine acquisita nel Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale della Scuola di Ingegneria e Architettura con sede a Forlì;*
- Fig. 4.24: *Immagine acquisita nel Laboratorio di Simulazione e Realtà Virtuale della Scuola di Ingegneria e Architettura con sede a Forlì.*

REFERENCES FIGURE

APPENDICE

PROVE SPERIMENTALI

SOLLECITAZIONE 60 s, S – R ATTIVA, DISTANZA RAVVICINATA

*Fig. A.1 immagini a t_0 .**Fig. A.2 immagini a t_0+2 .*

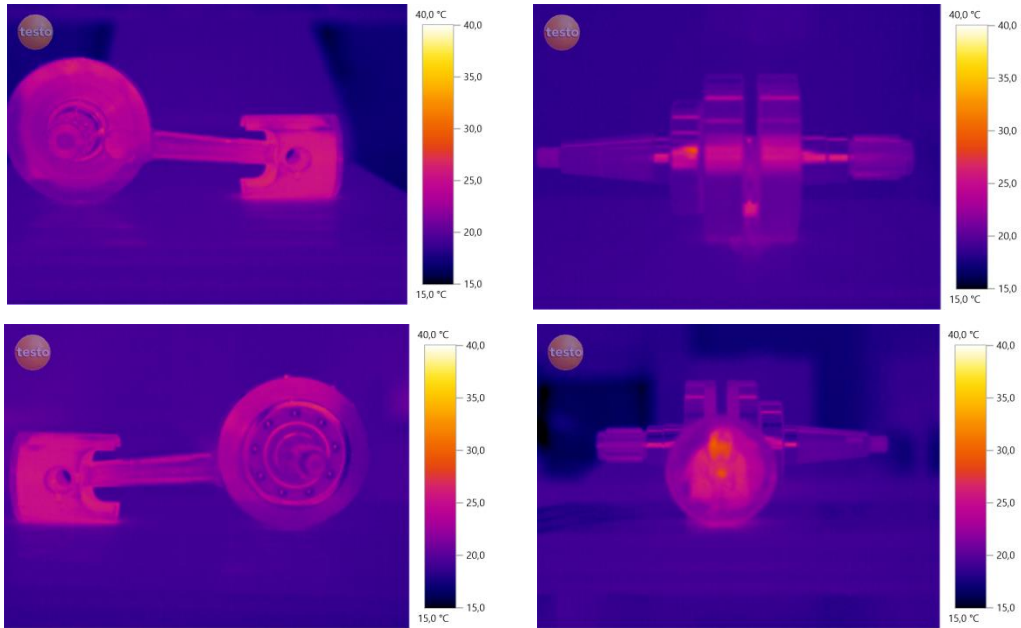


Fig. A.3 immagini a t_0+4 .

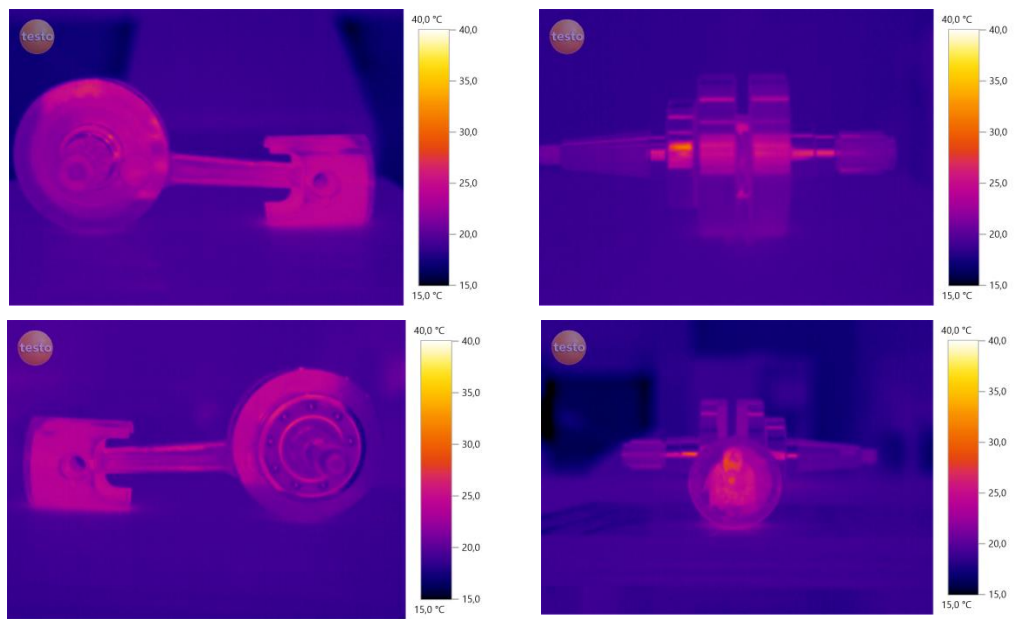
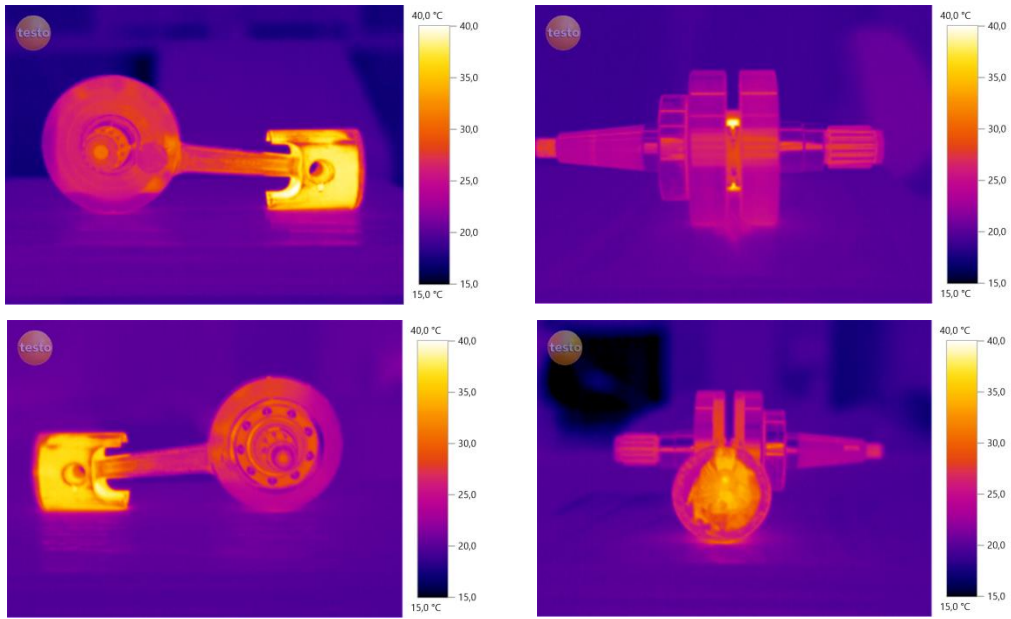
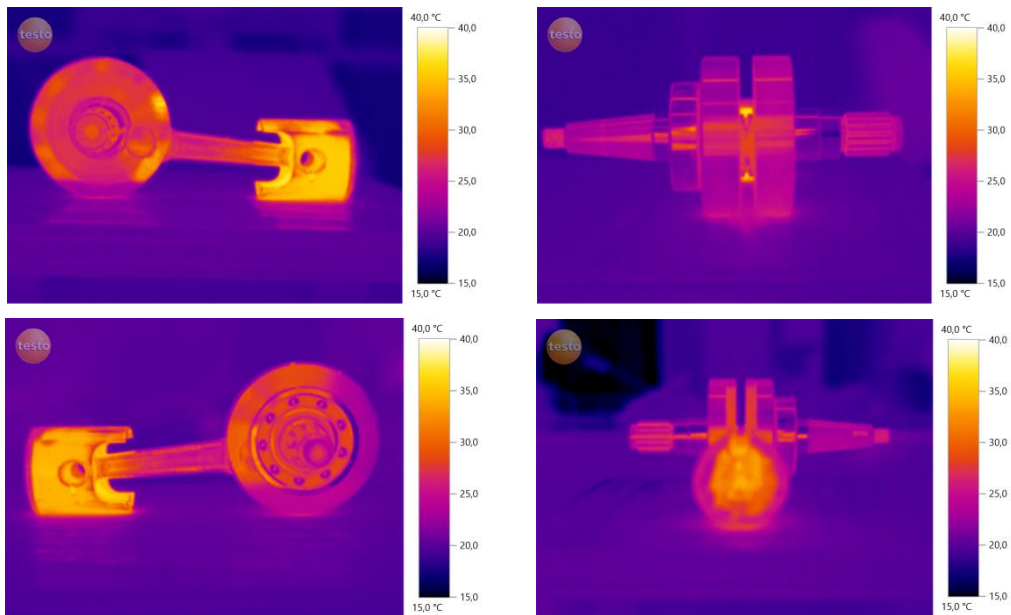


Fig. A.4 immagini a t_0+8 .

SOLLECITAZIONE 180 s, S – R ATTIVA, DISTANZA RAVVICINATA*Fig. A.5 immagini a t_0 .**Fig. A.6 immagini a t_0+2 .*

APPENDICE

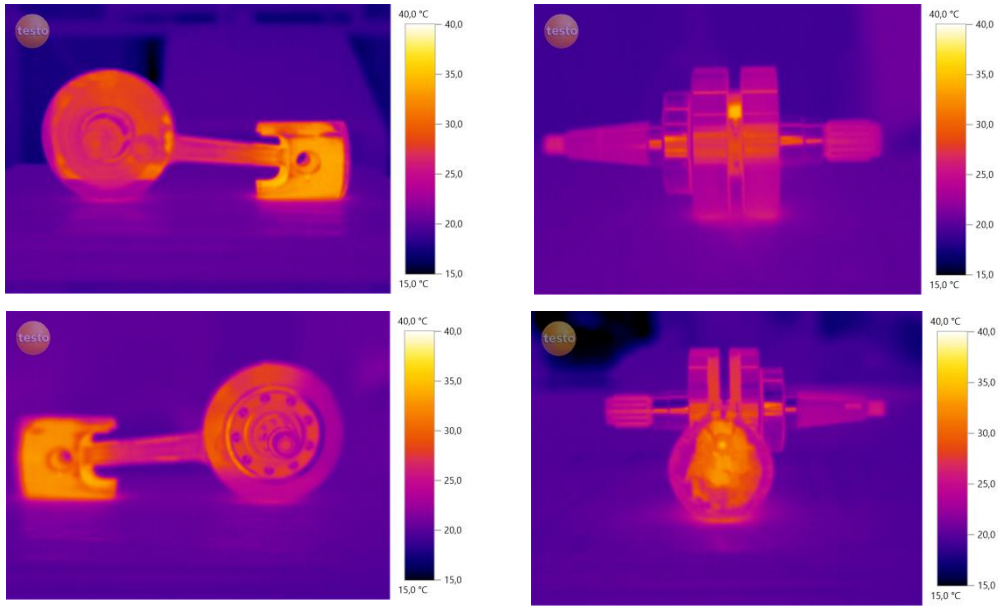


Fig. A.7 immagini a t_0+4 .

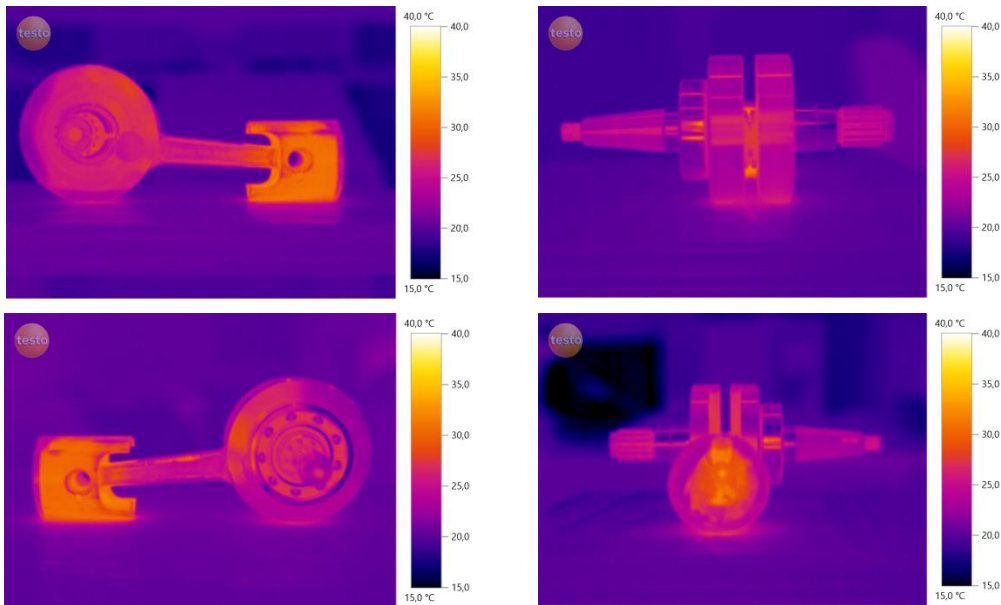


Fig. A.8 immagini a t_0+8 .

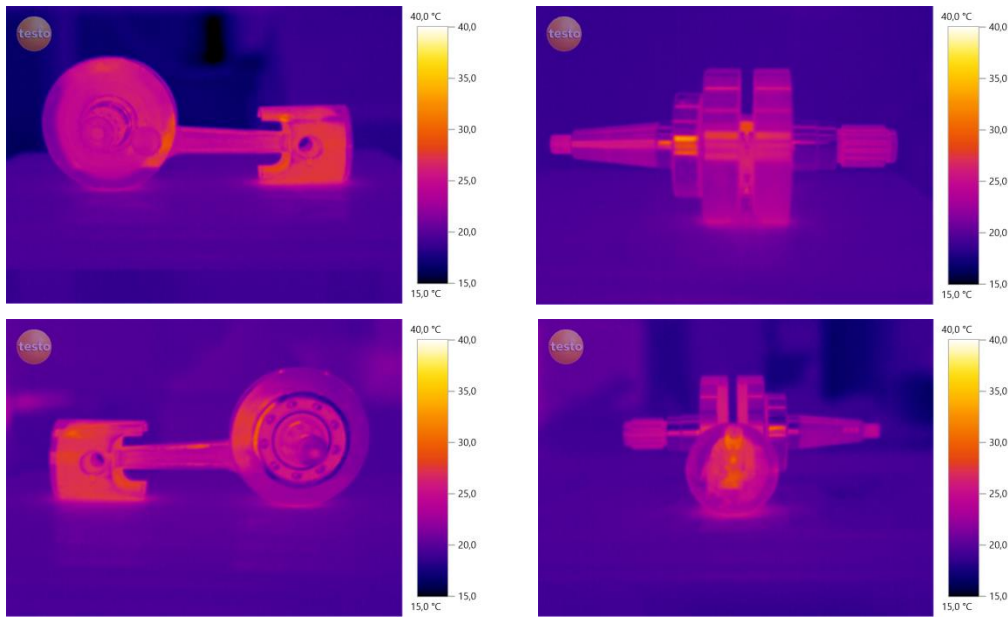
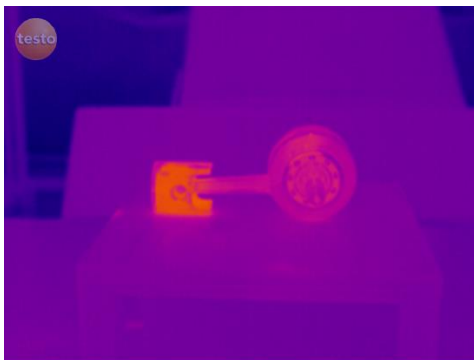


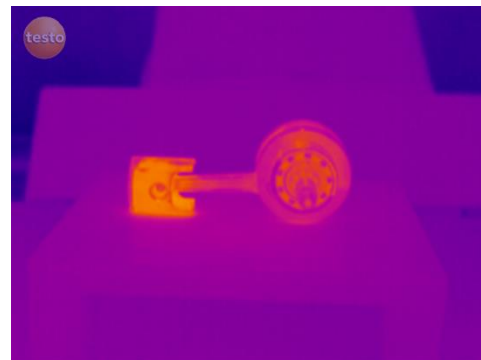
Fig. A.9 immagini a t_0+15 .

**PROVE SEZIONE C - D DEL PISTONE ALLA DISTANZA
DI UN METRO, SOLLECITAZIONE 120 s**

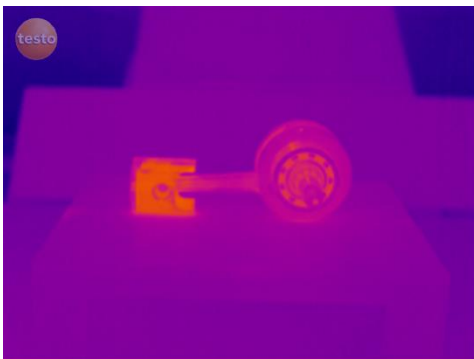
SEZIONE C



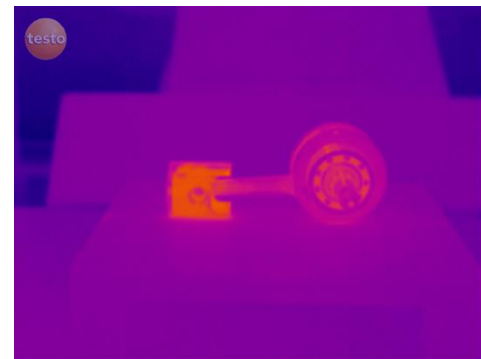
S - R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S - R a mano libera

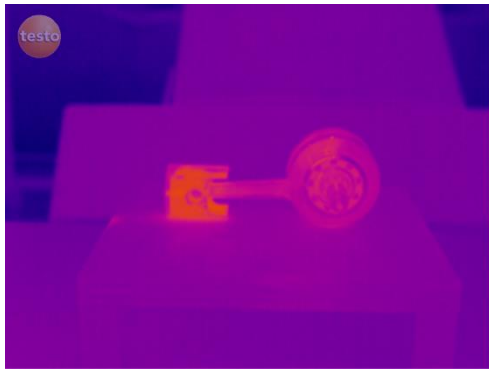


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)

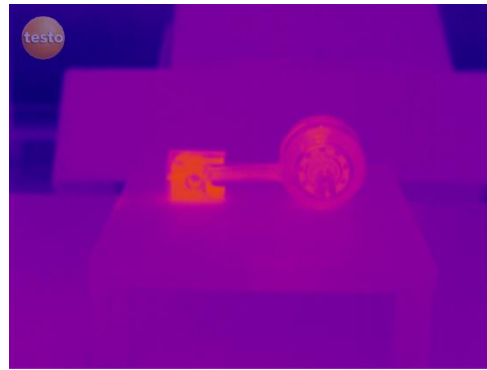


RIS. MAX a mano libera

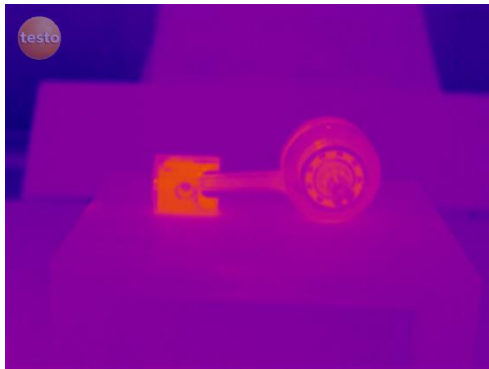
Fig. A.10 immagini a t_0+2 .



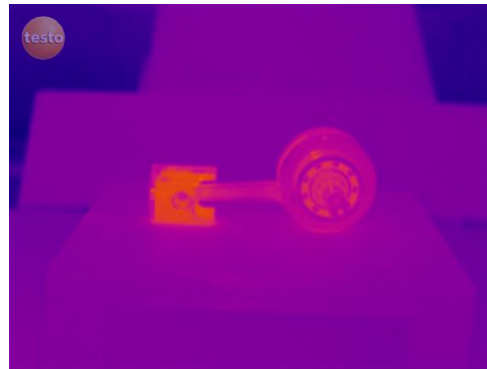
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

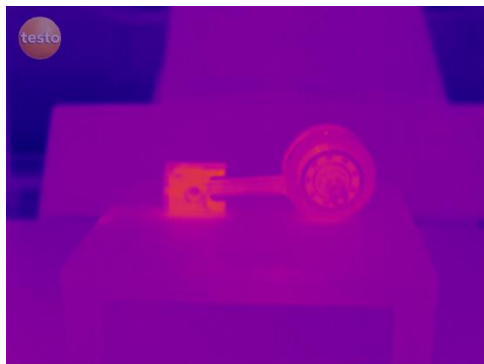


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)

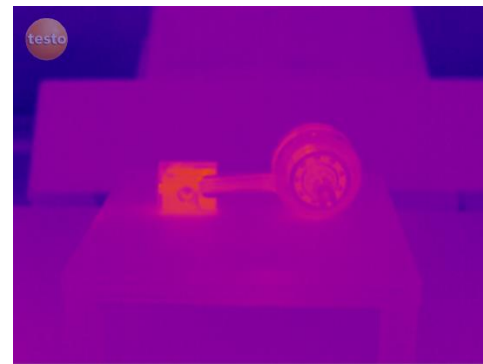


RIS. MAX a mano libera

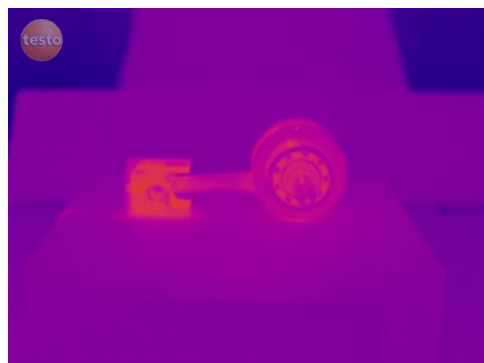
Fig. A.11 immagini a t_0+4 .



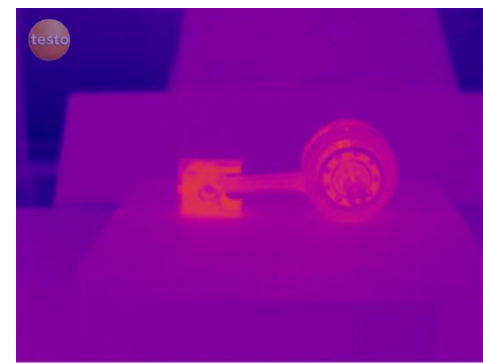
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera



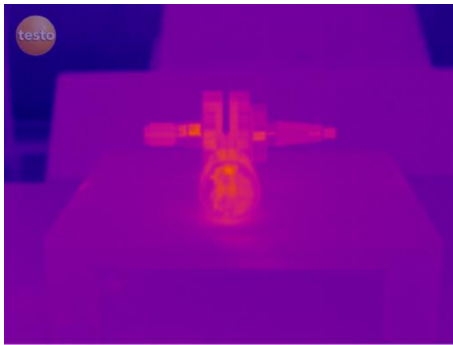
RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



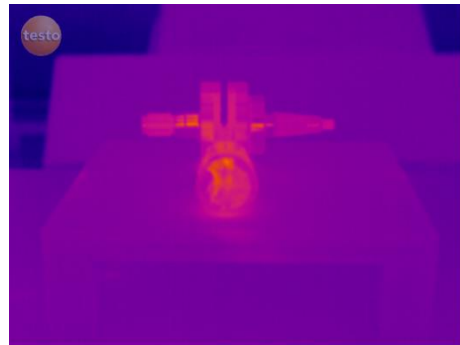
RIS. MAX a mano libera

Fig. A.12 immagini a t_0+8 .

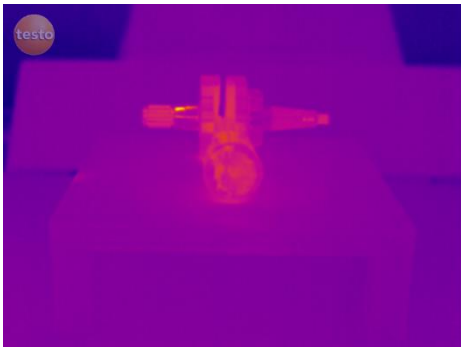
SEZIONE D



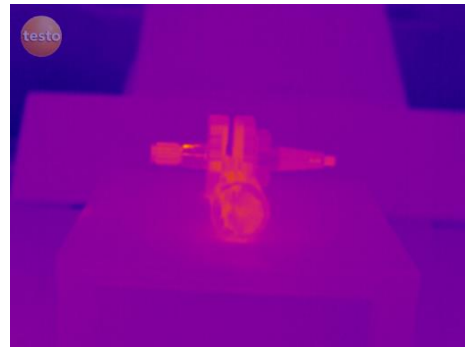
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

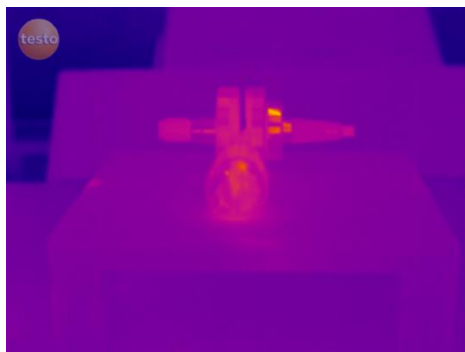


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)

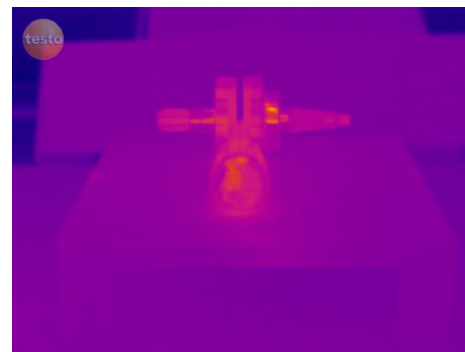


RIS. MAX a mano libera

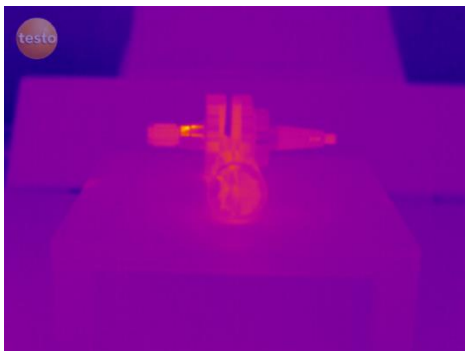
Fig. A.13 immagini a t_0+2 .



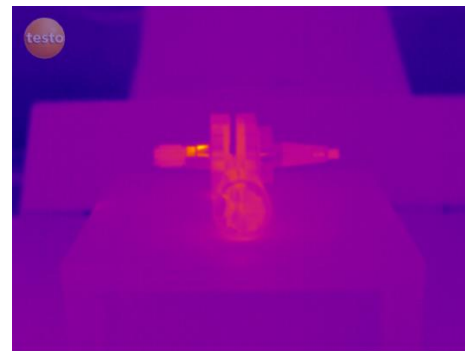
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

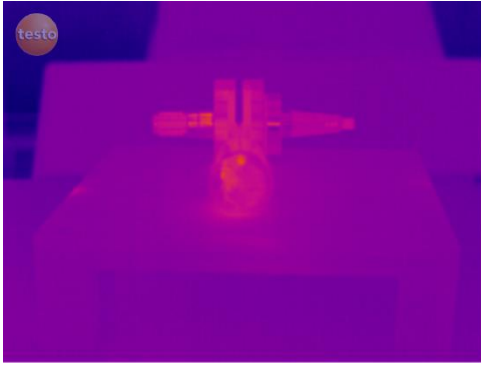


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)

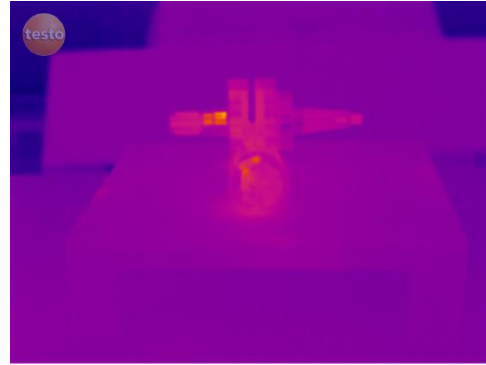


RIS. MAX a mano libera

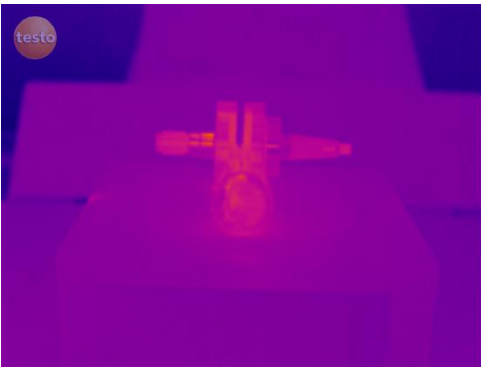
Fig. A.14 immagini a t_0+4 .



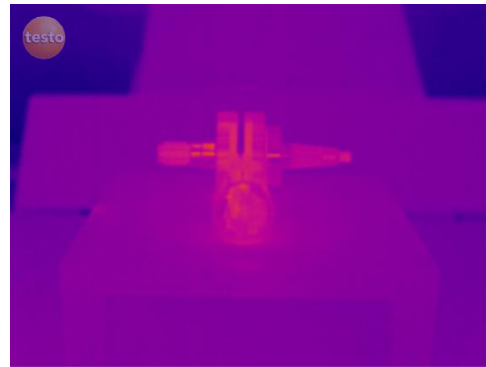
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera



RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)

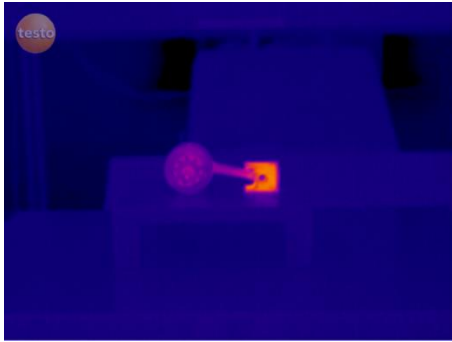


RIS. MAX a mano libera

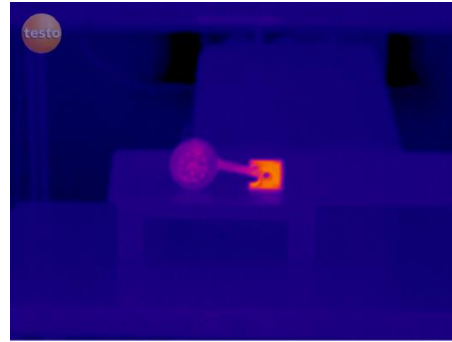
Fig. A.15 immagini a t_0+8 .

**PROVE SEZIONE C - D DEL PISTONE ALLA DISTANZA
DI UN METRO E MEZZO, SOLLECITAZIONE 120 s**

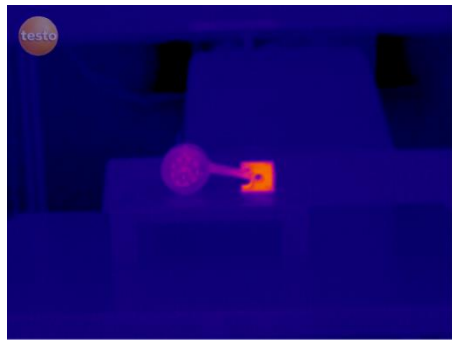
SEZIONE C



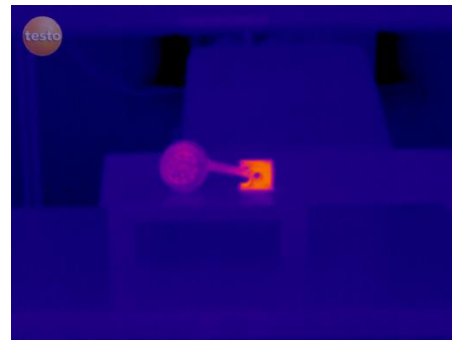
S - R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S - R a mano libera

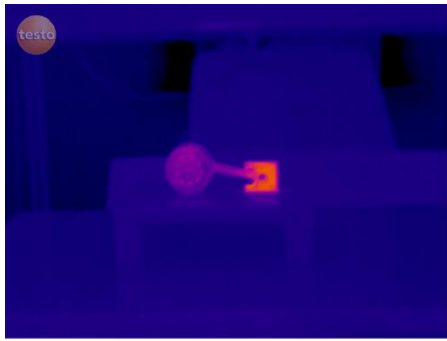


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)

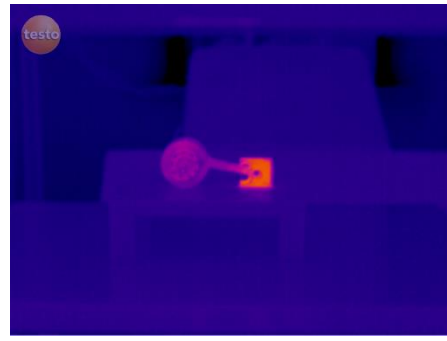


RIS. MAX a mano libera

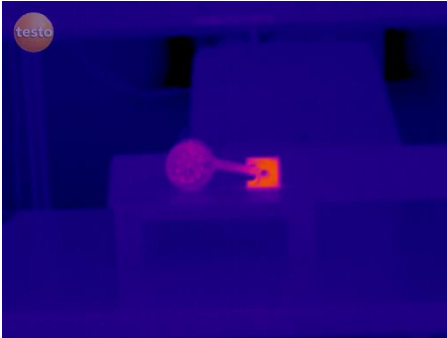
Fig. A.16 immagini a t_0 .



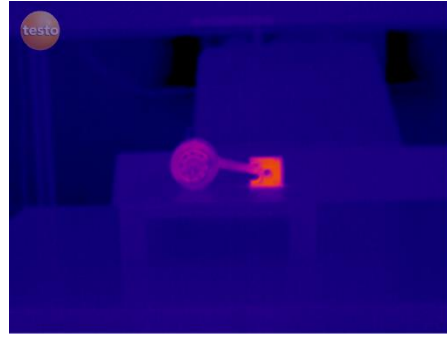
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

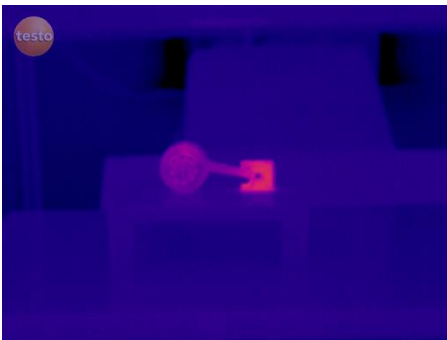


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)

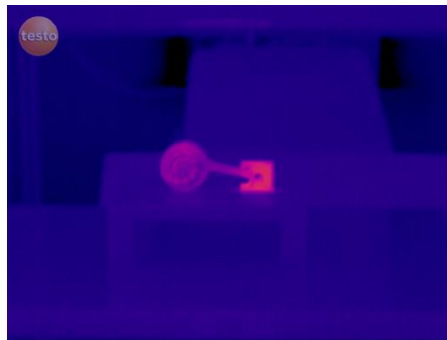


RIS. MAX a mano libera

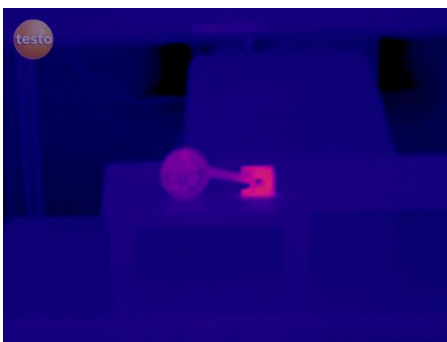
Fig. A.17 immagini a t_0+5



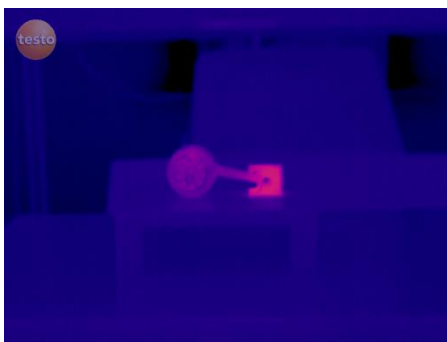
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

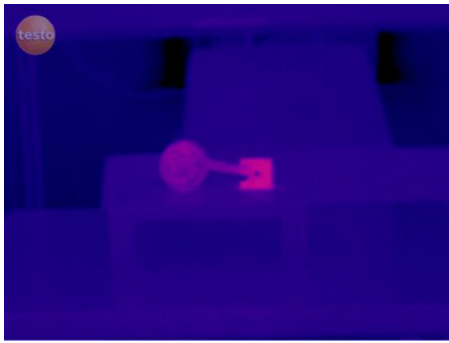


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)

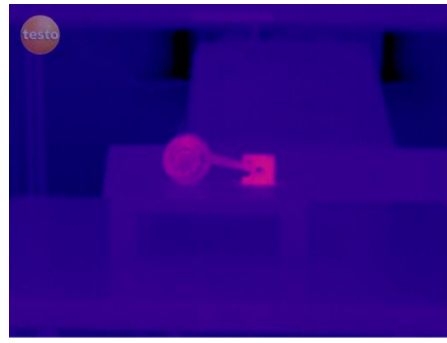


RIS. MAX a mano libera

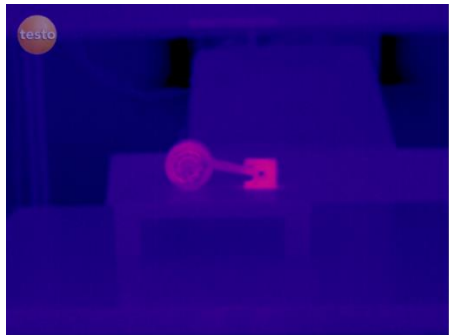
Fig. A.18 immagini a t_0+10 .



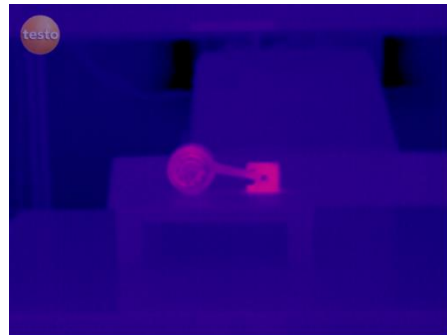
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera



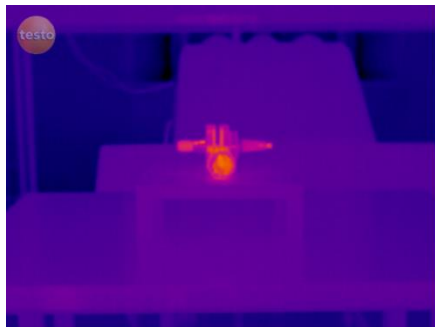
RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



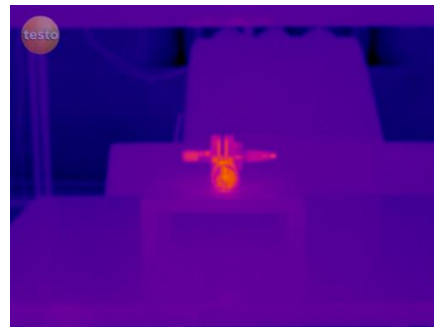
RIS. MAX a mano libera

Fig. A.19 immagini a t_0+15 .

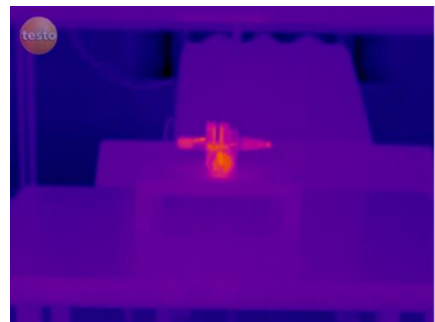
SEZIONE D



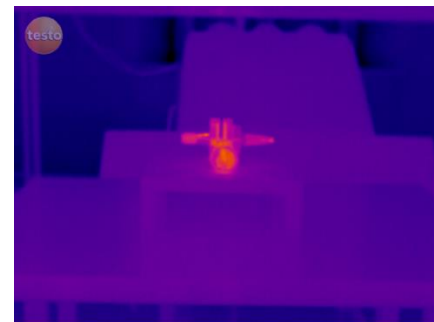
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

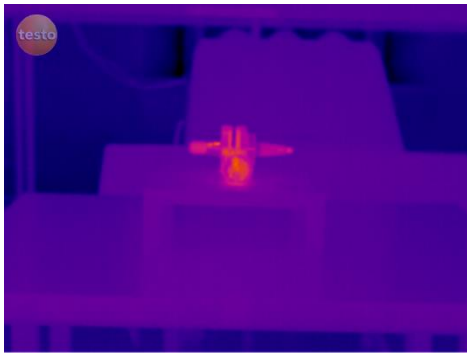


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)

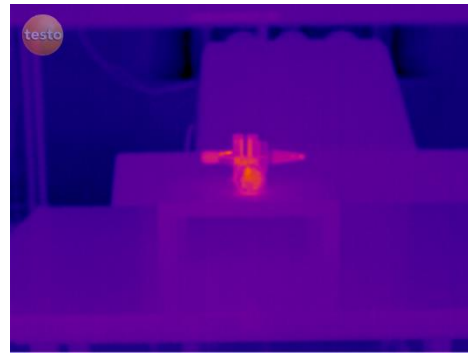


RIS. MAX a mano libera

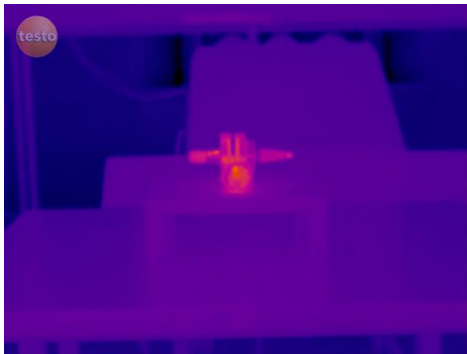
A.20 immagini a t_0 .



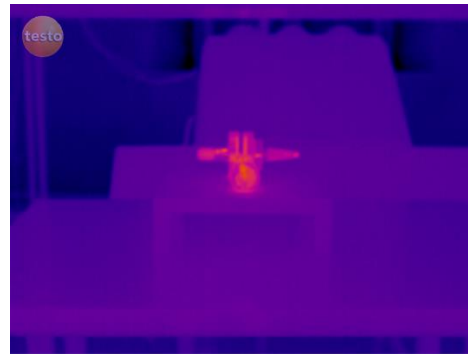
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

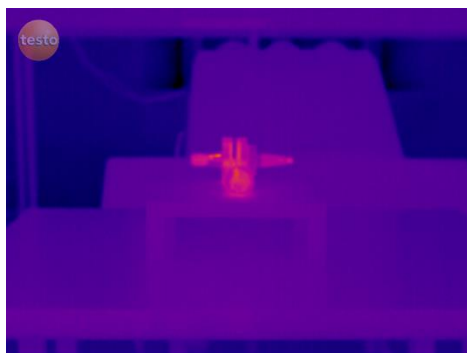


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)

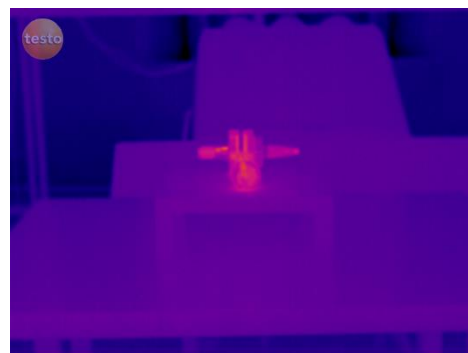


RIS. MAX a mano libera

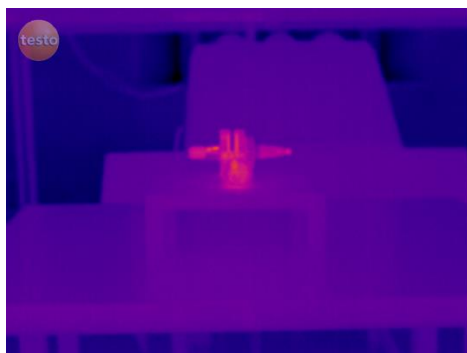
Fig. A.21 immagini a t_0+5 .



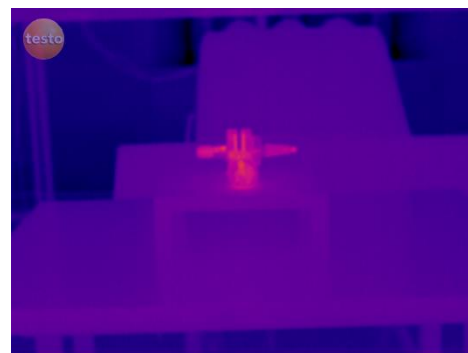
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

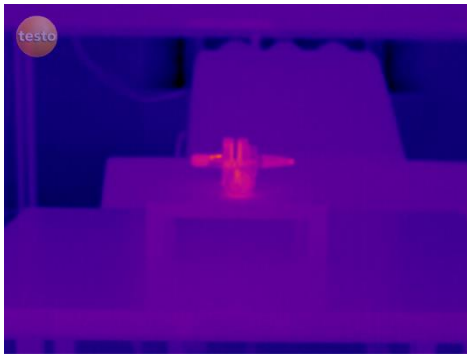
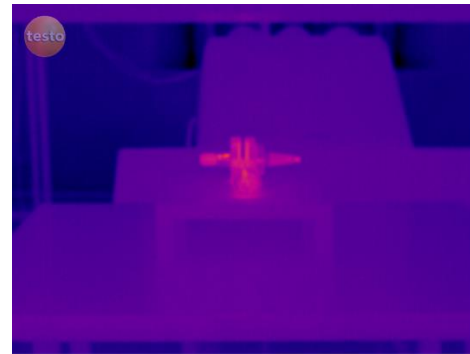
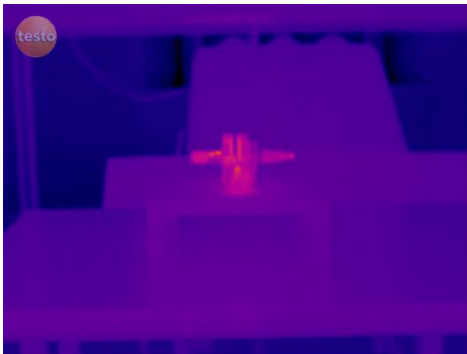
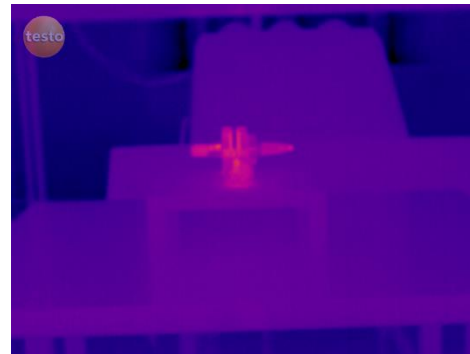


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



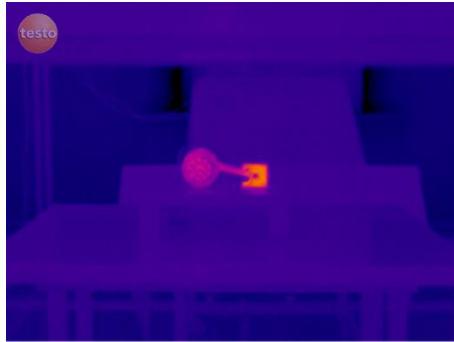
RIS. MAX a mano libera

Fig. A.22 immagini a t_0+10 .

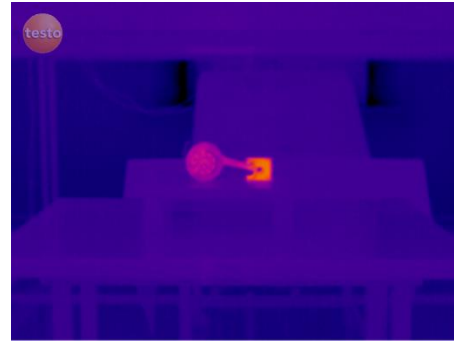
**S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)****S – R a mano libera****RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)****RIS. MAX a mano libera***Fig. A.23 immagini a t_0+15 .*

**PROVE SEZIONE C - D DEL PISTONE ALLA DISTANZA
DI DUE METRI, SOLLECITAZIONE 120 s**

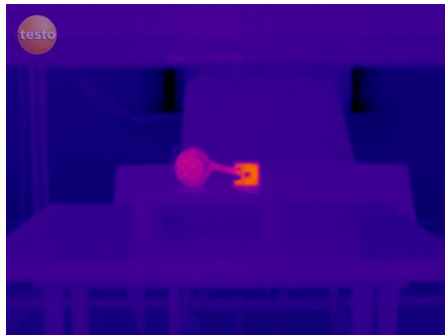
SEZIONE C



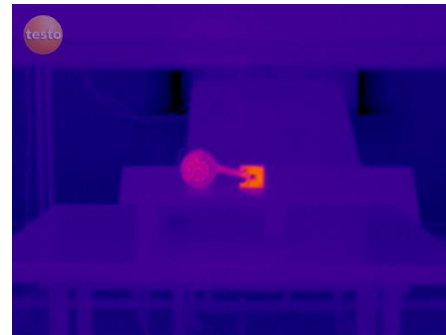
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

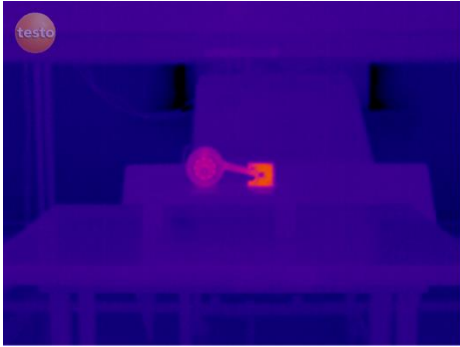


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)

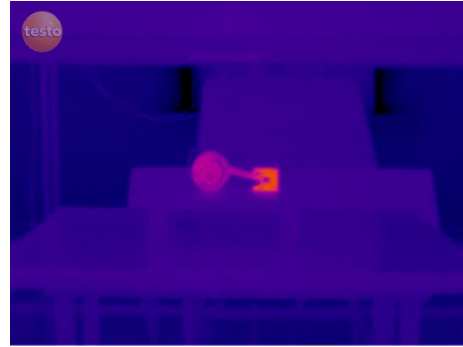


RIS. MAX a mano libera

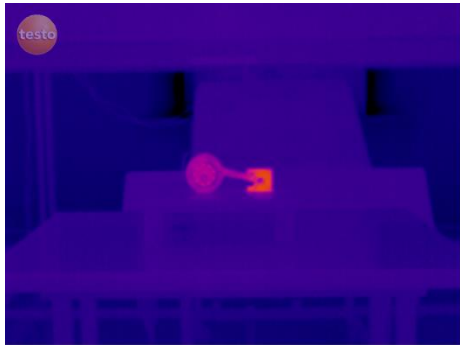
Fig. A.24 immagini a t_0 .



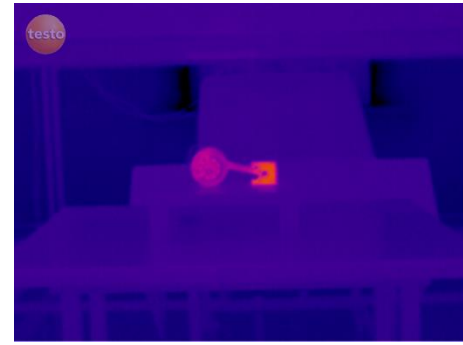
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

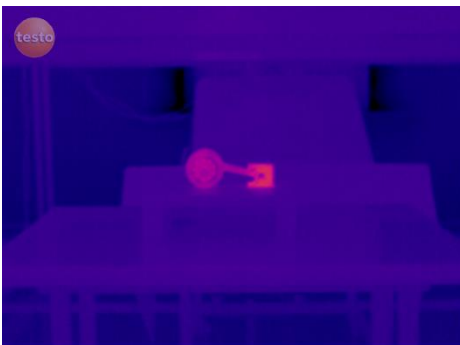


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)

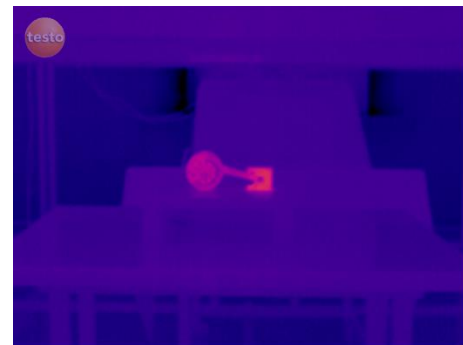


RIS. MAX a mano libera

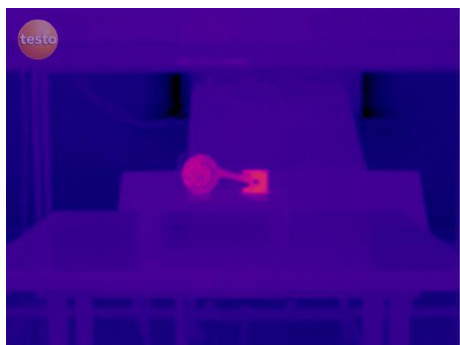
Fig. A.25 immagini a t_0+5 .



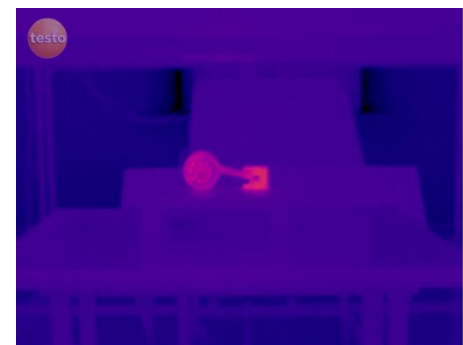
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

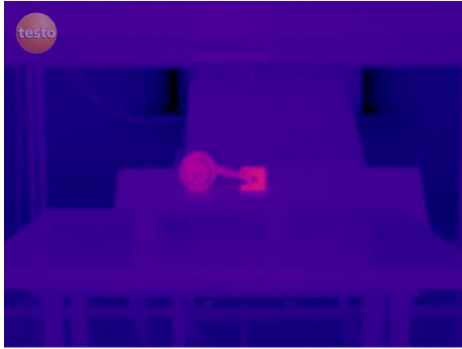


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)

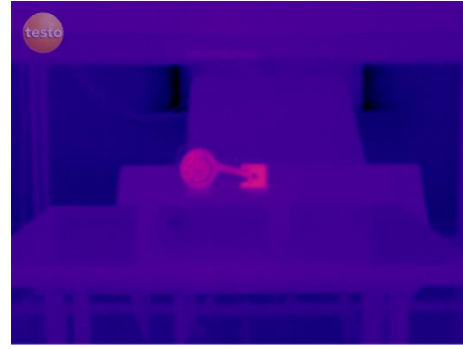


RIS. MAX a mano libera

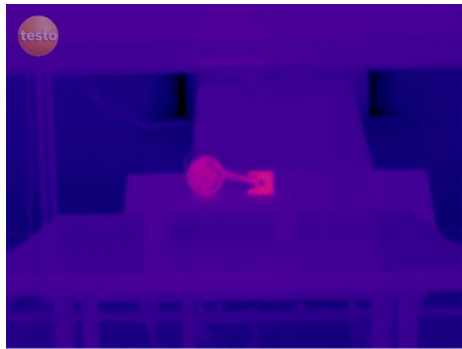
Fig. A.26 immagini a t_0+10 .



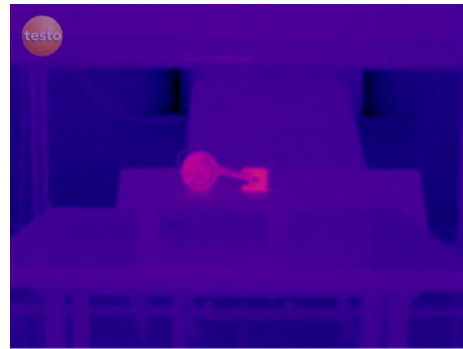
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera



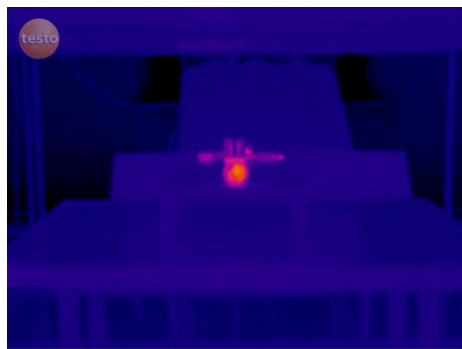
RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



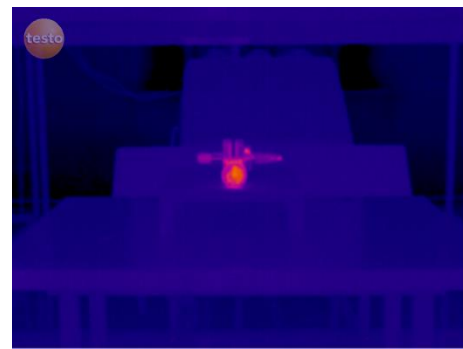
RIS. MAX a mano libera

Fig. A.27 immagini a t_0+15 .

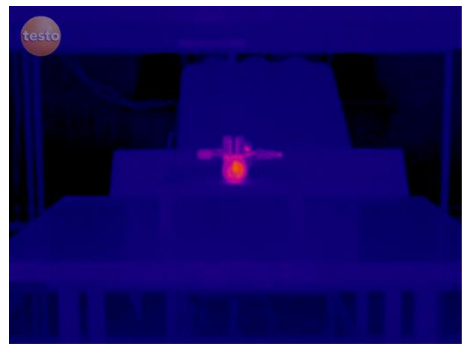
SEZIONE D



S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

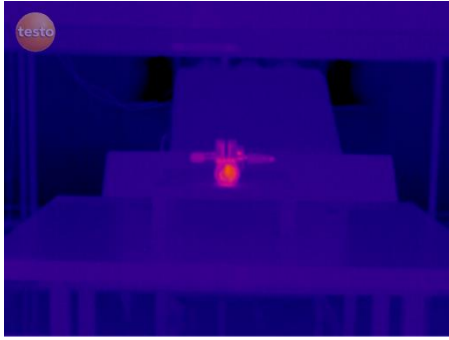


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)

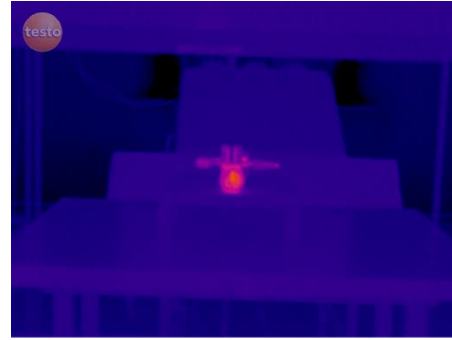


RIS. MAX a mano libera

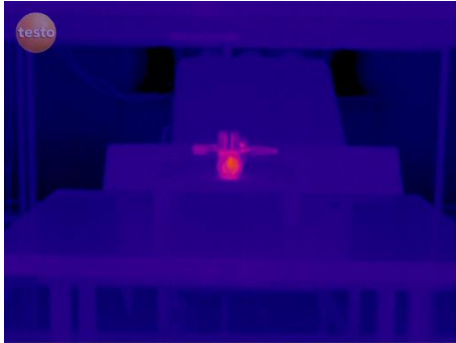
Fig. A.28 immagini a t_0 .



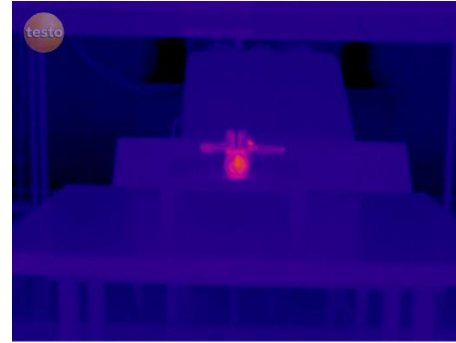
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

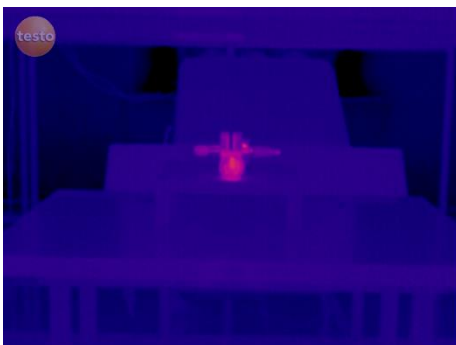


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)

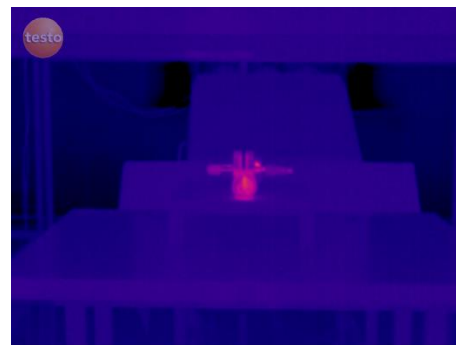


RIS. MAX a mano libera

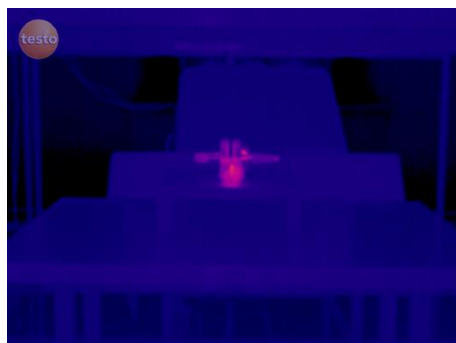
Fig. A.28 immagini a t_0+5 .



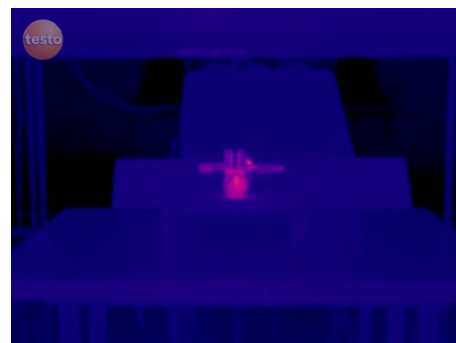
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

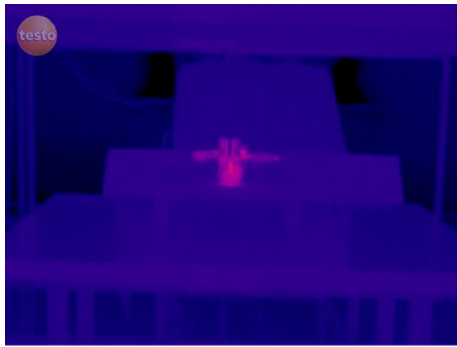


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)

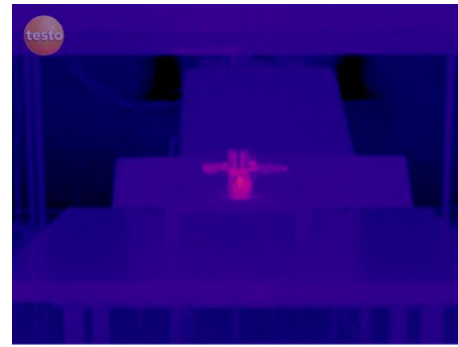


RIS. MAX a mano libera

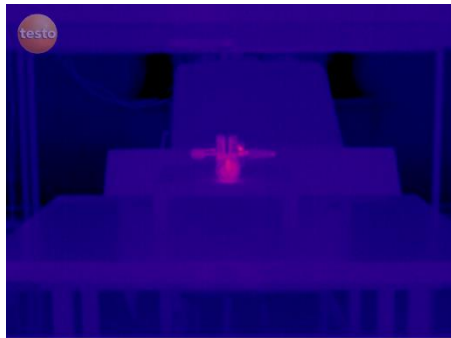
Fig. A.29 immagini a t_0+10 .



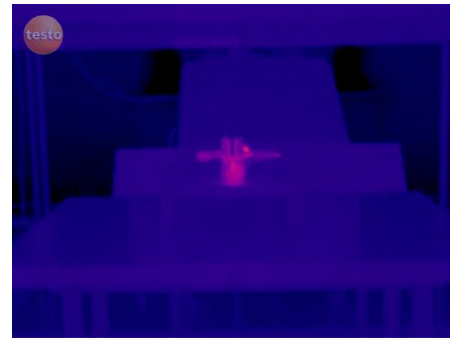
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera



RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)

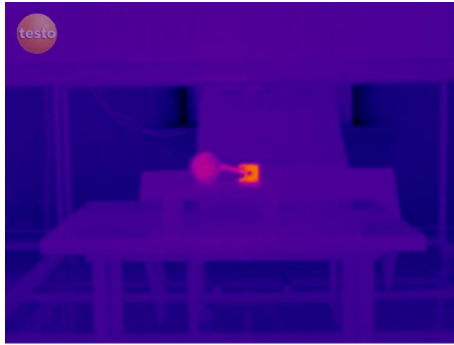


RIS. MAX a mano libera

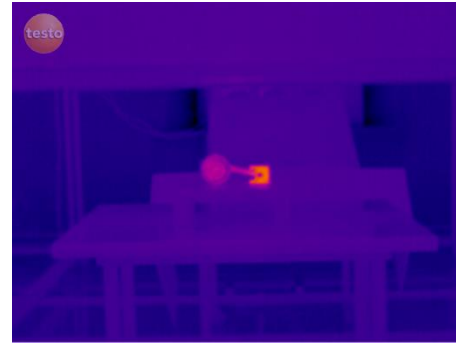
Fig. A.30 immagini a t_0+15 .

**PROVE SEZIONE C - D DEL PISTONE ALLA DISTANZA
DI DUE METRI E MEZZO, SOLLECITAZIONE 120 s**

SEZIONE C



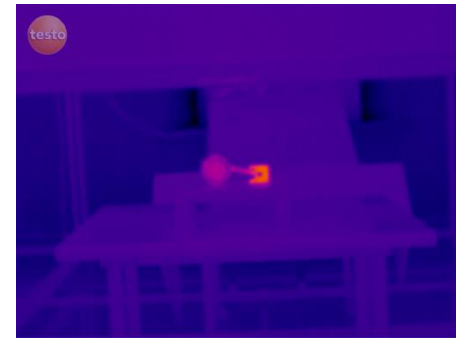
S - R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S - R a mano libera

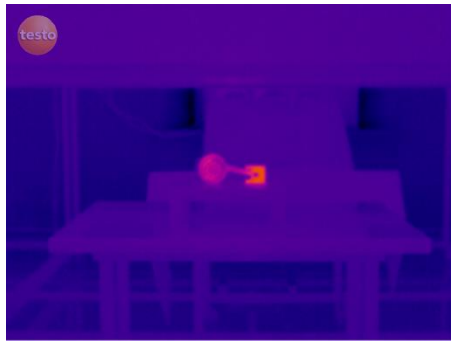


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)

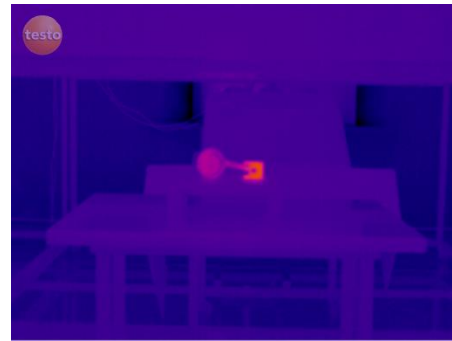


RIS. MAX a mano libera

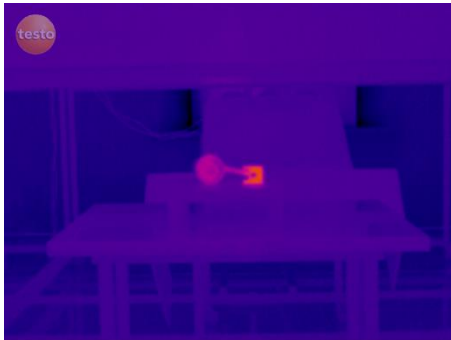
Fig. A.31 immagini a t_0 .



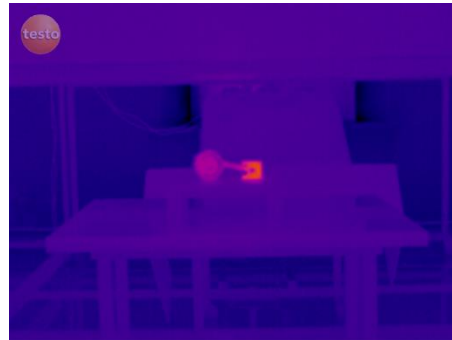
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

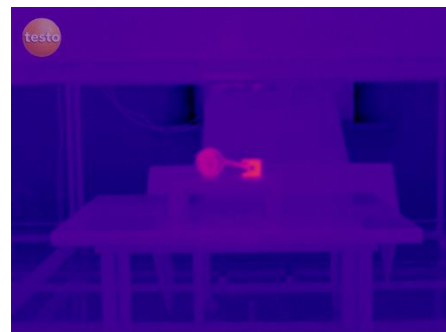


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



RIS. MAX a mano libera

Fig. A.32 immagini a t_0+5 .



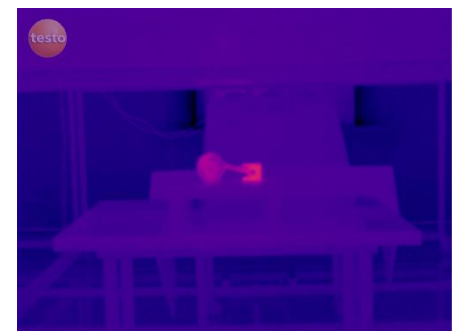
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera



RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)

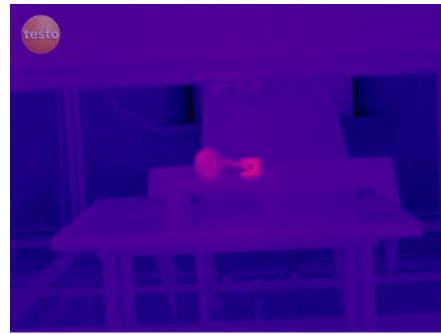


RIS. MAX a mano libera

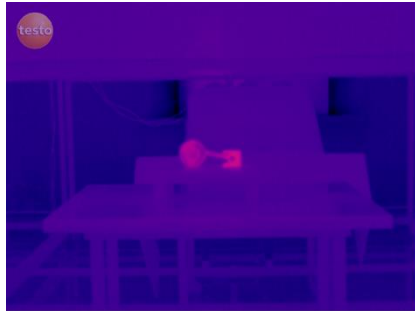
Fig. A.33 immagini a t_0+10 .



S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera



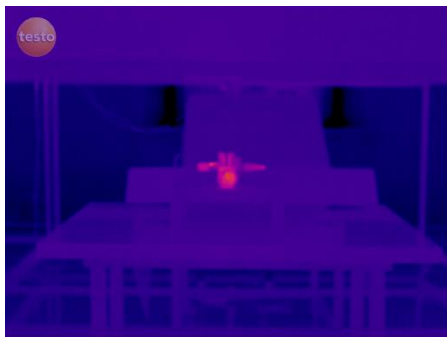
RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



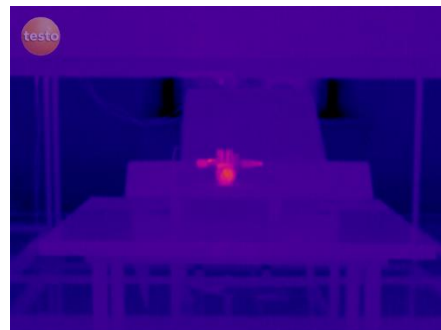
RIS. MAX a mano libera

Fig. A.34 immagini a t_0+15 .

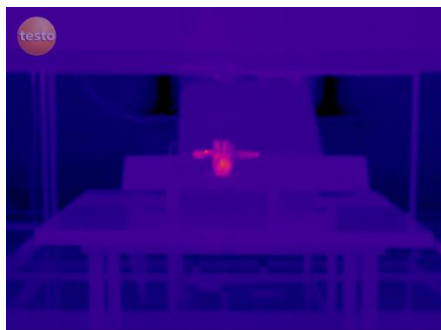
SEZIONE D



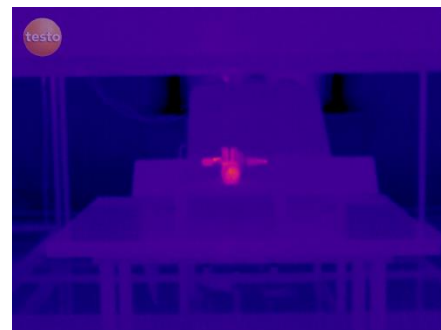
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera



RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



RIS. MAX a mano libera

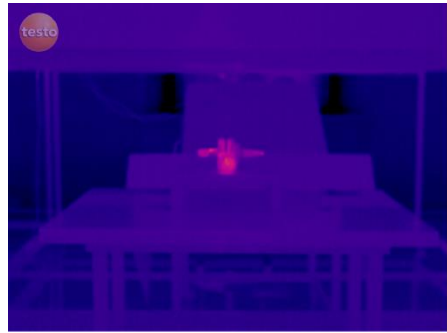
Fig. A.35 immagini a t_0 .



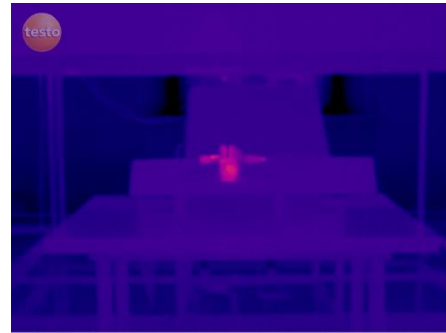
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

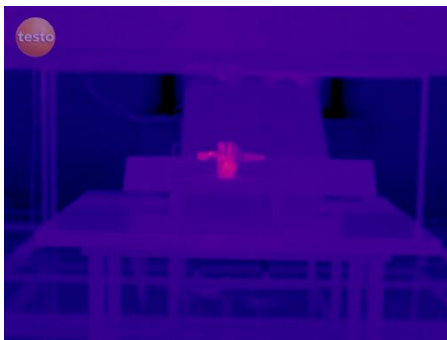


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)

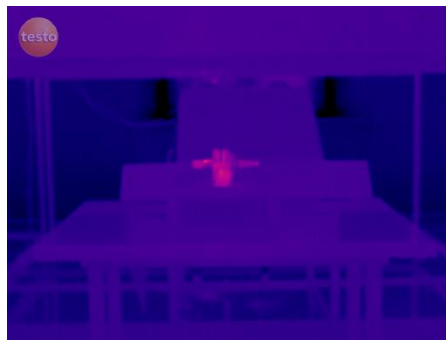


RIS. MAX a mano libera

Fig. A.36 immagini a t_0+5 .



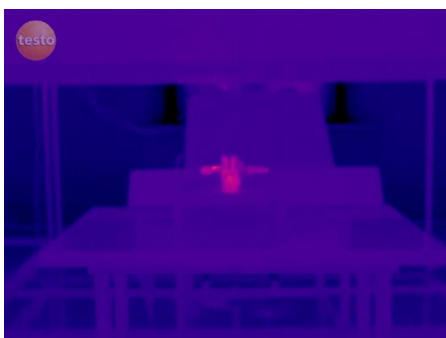
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

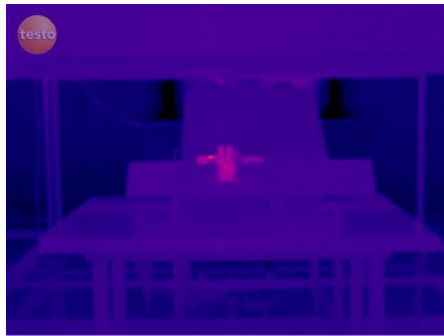
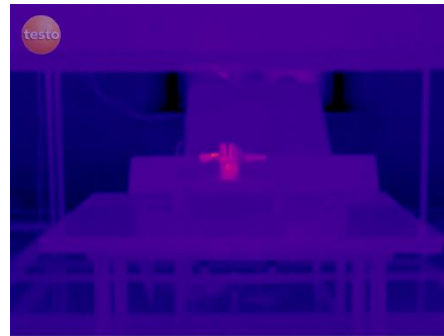
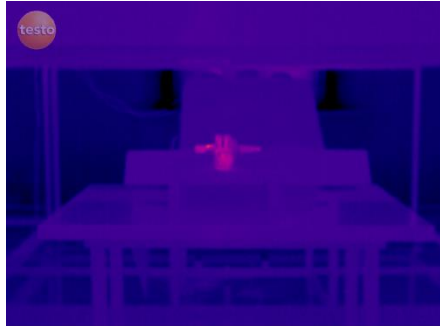


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



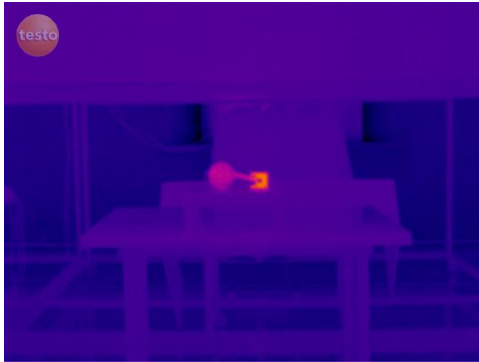
RIS. MAX a mano libera

Fig. A.37 immagini a t_0+10 .

**S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)****S – R a mano libera****RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)****RIS. MAX a mano libera***Fig. A.38 immagini a t_0+15 .*

**PROVE SEZIONE C - D DEL PISTONE ALLA DISTANZA
DI TRE METRI, SOLLECITAZIONE 120 s**

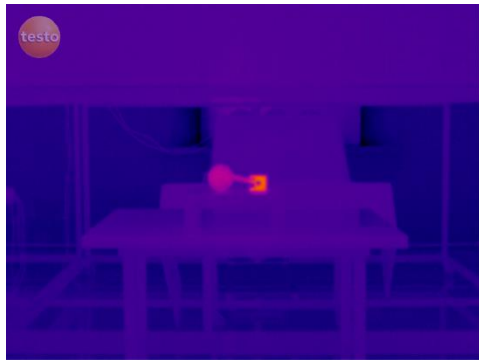
SEZIONE C



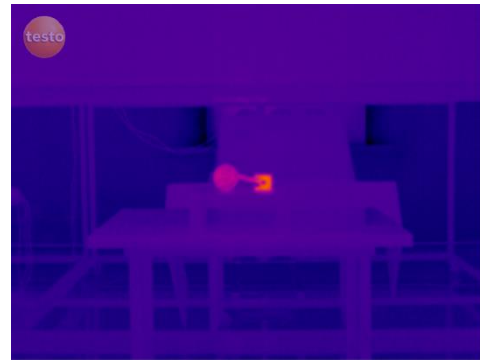
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

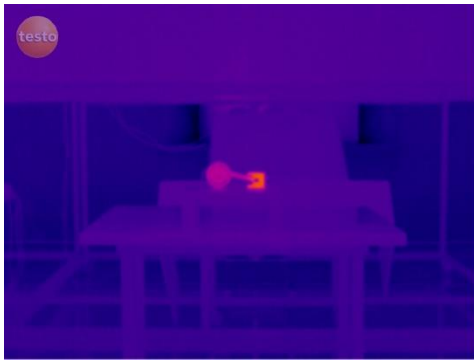


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)

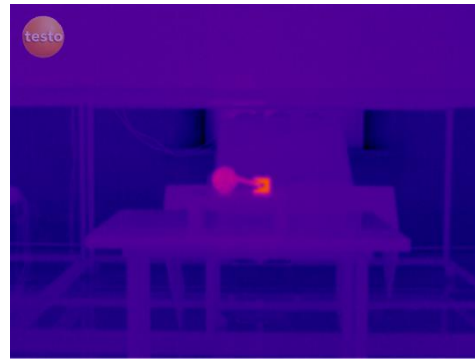


RIS. MAX a mano libera

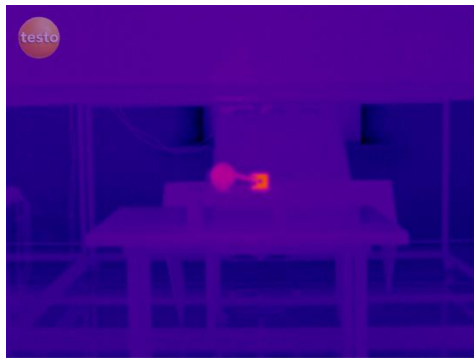
Fig. A.39 immagini a t_0 .



S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

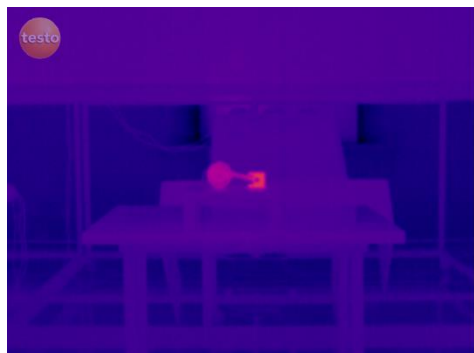


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



RIS. MAX a mano libera

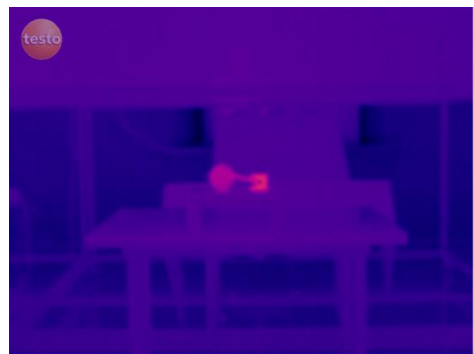
Fig. A.40 immagini a t_0+5 .



S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera



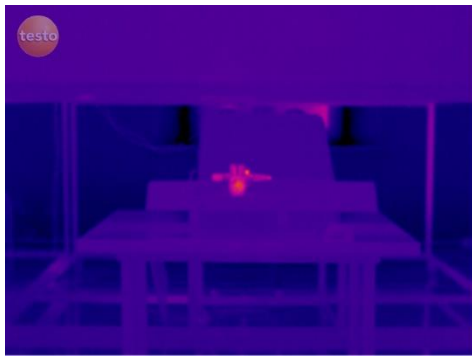
RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



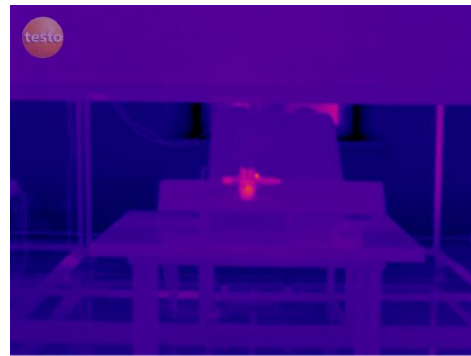
RIS. MAX a mano libera

Fig. A.41 immagini a t_0+10 .

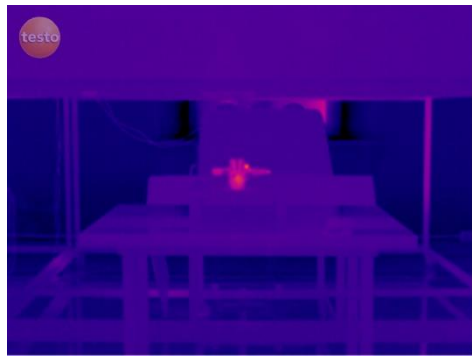
SEZIONE D



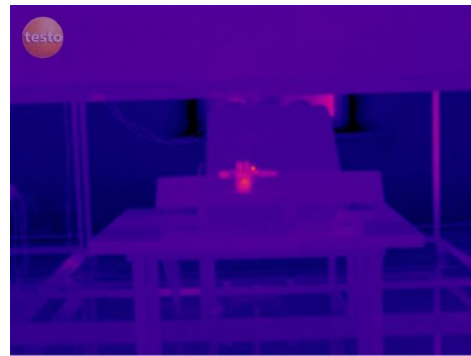
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

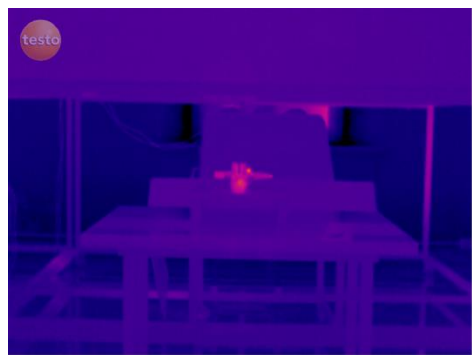


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



RIS. MAX a mano libera

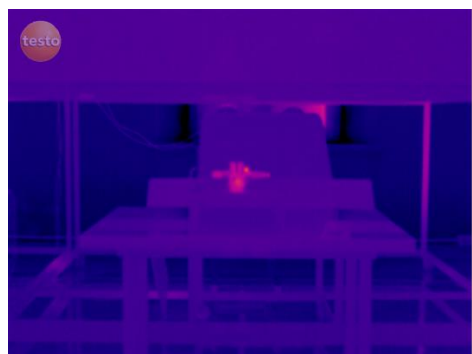
Fig. A.42 immagini a t_0 .



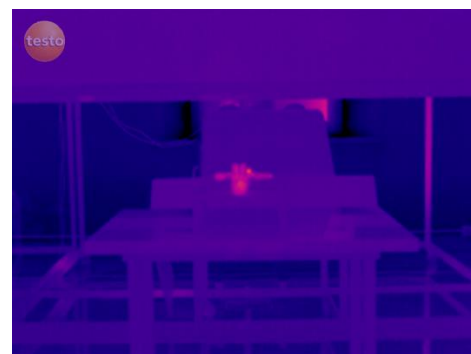
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera



RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



RIS. MAX a mano libera

Fig. A.43 immagini a t_0+5 .

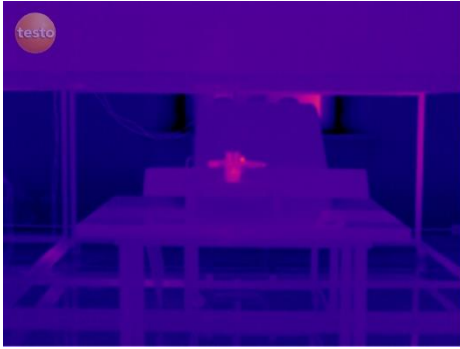
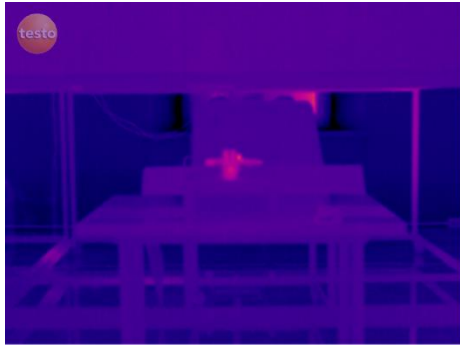
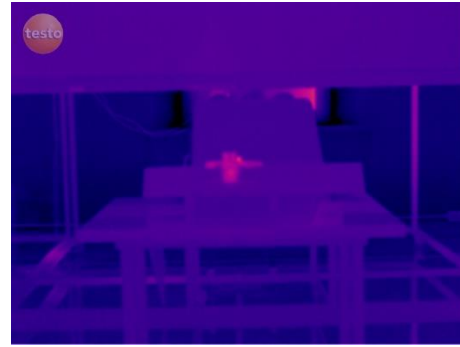
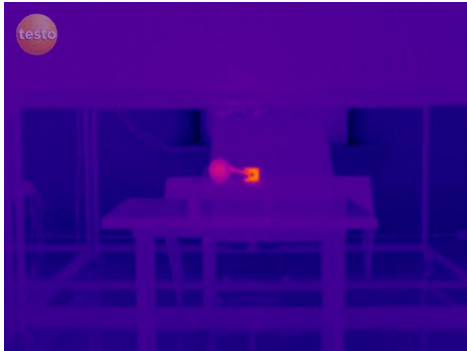
**S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)****S – R a mano libera****RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)****RIS. MAX a mano libera**

Fig. A.44 immagini a t_0+10 .

**PROVE SEZIONE C - D DEL PISTONE ALLA DISTANZA
DI TRE METRI E MEZZO, SOLLECITAZIONE 120 s**

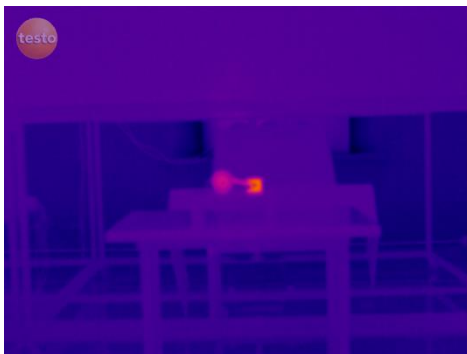
SEZIONE C



S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

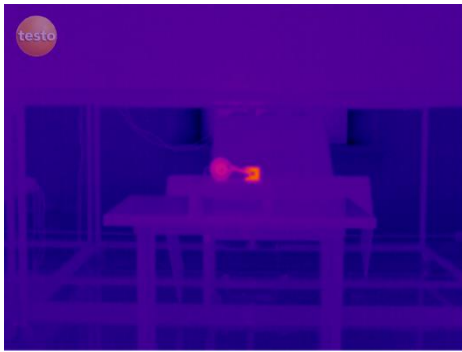


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



RIS. MAX a mano libera

Fig. A.45 immagini a t_0 .



S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera



RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



RIS. MAX a mano libera

Fig. A.46 immagini a t_0+5 .



S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera



RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



RIS. MAX a mano libera

Fig. A.47 immagini a t_0+10 .



S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera



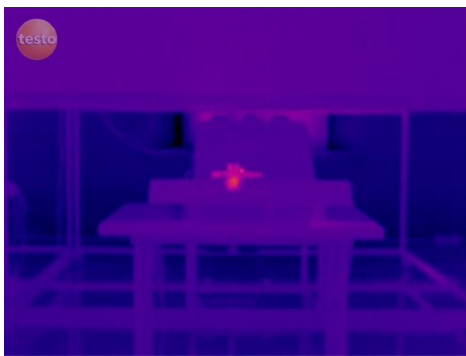
RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



RIS. MAX a mano libera

Fig. A.48 immagini a t_0+15 .

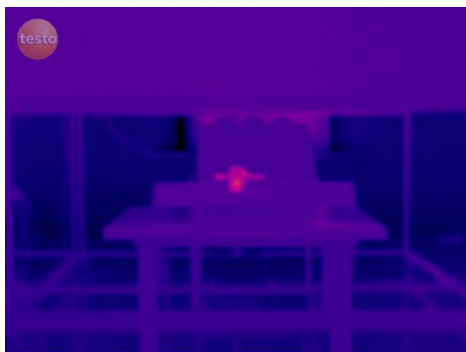
SEZIONE D



S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

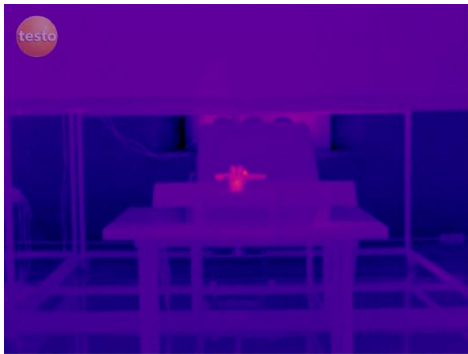


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)

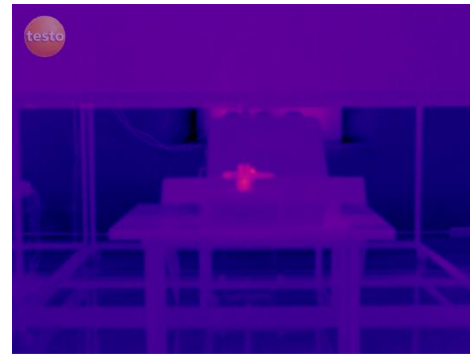


RIS. MAX a mano libera

Fig. A.49 immagini a t_0+5 .



S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera



RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



RIS. MAX a mano libera

Fig. A.50 immagini a t_0+10 .

**PROVE SEZIONE C - D DEL PISTONE ALLA DISTANZA
DI QUATTRO METRI, SOLLECITAZIONE 120 s**

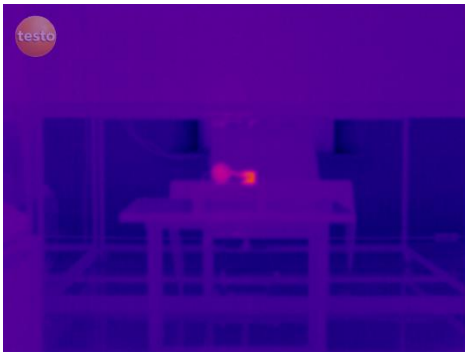
SEZIONE C



S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera



RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



RIS. MAX a mano libera

Fig. A.51 immagini a t_0+5 .



S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera



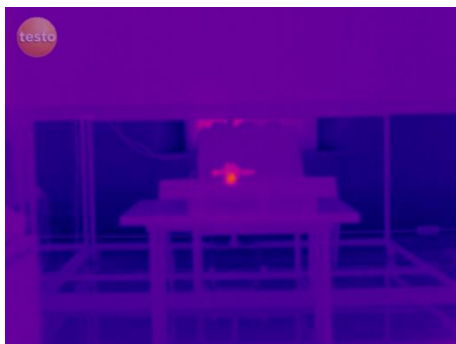
RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



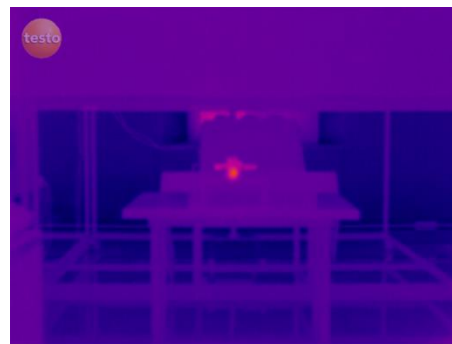
RIS. MAX a mano libera

Fig. A.52 immagini a t_0+10 .

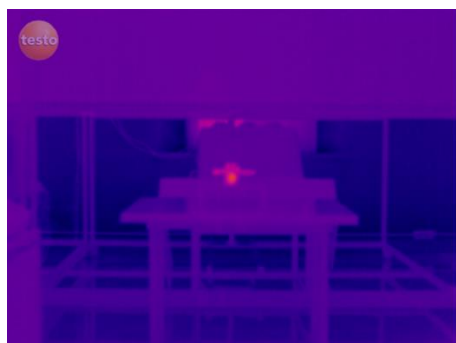
SEZIONE D



S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

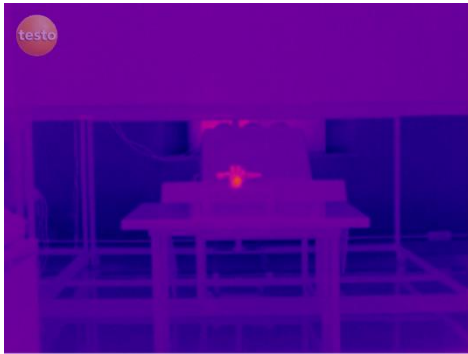


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



RIS. MAX a mano libera

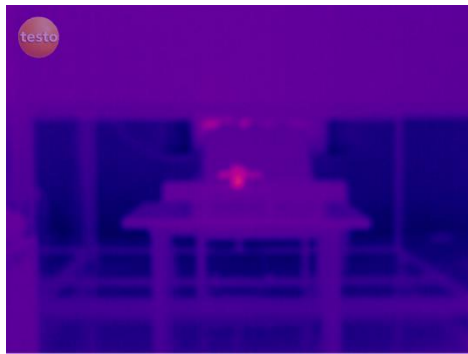
Fig. A.53 immagini a t_0 .



S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

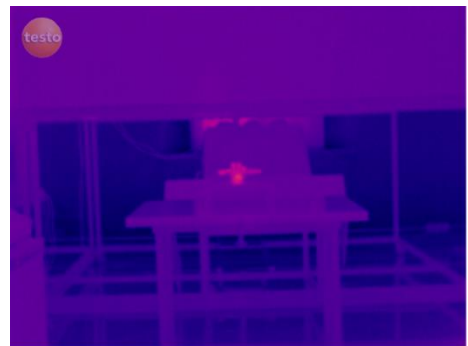


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)

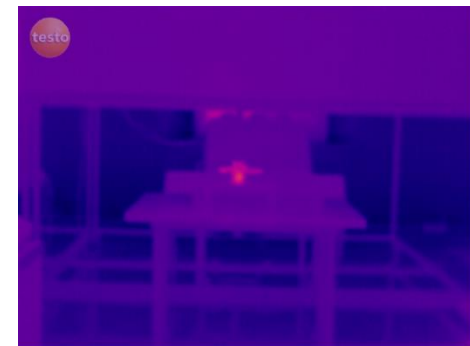


RIS. MAX a mano libera

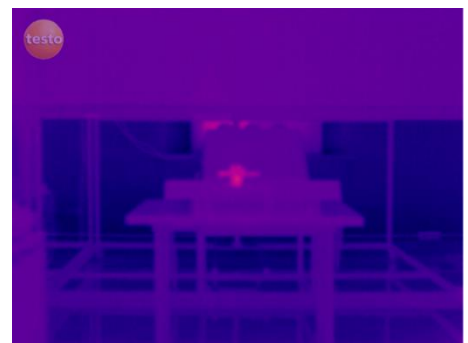
Fig. A.54 immagini a t_0+5 .



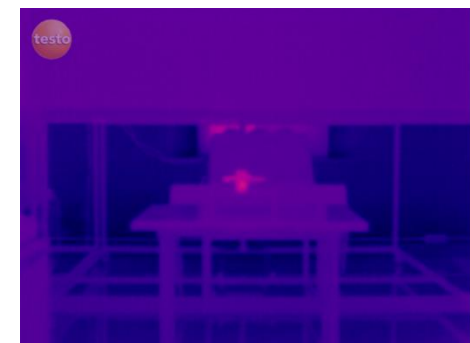
S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)



S – R a mano libera

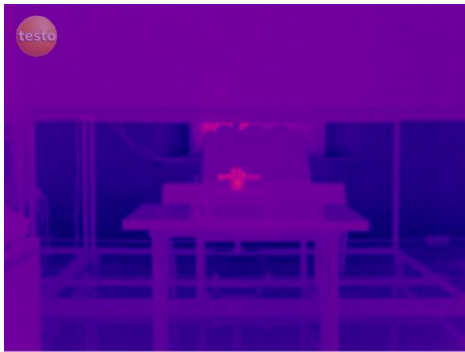
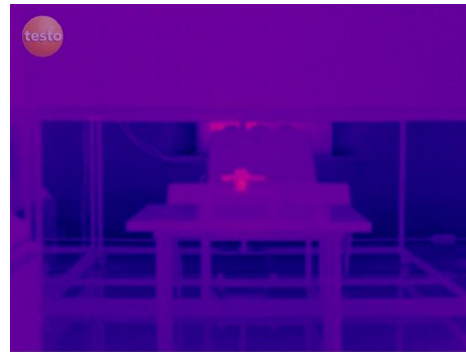
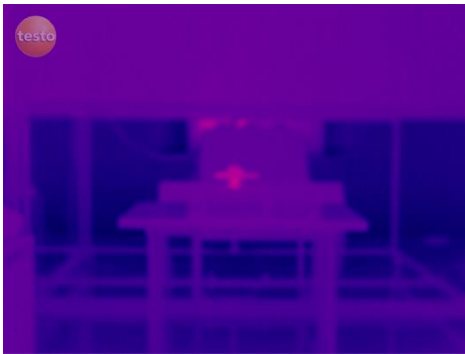


RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)



RIS. MAX a mano libera

Fig. A.55 immagini a t_0+10 .

**S – R a cavalletto ($G_d = 0.7$ cm)****S – R a mano libera****RIS. MAX a cavalletto ($G_d = 0$ cm)****RIS. MAX a mano libera***Fig. A.56 immagini a t_0+15 .*