

T. CARDINALE, P. DE FAZIO

Dipartimento Tecnologie Energetiche
Divisione Bioenergia, Bioraffineria e Chimica Verde
Centro Ricerche Trisaia, Matera

F. GRANDIZIO

Dipartimento Tecnologie Energetiche
Divisione Bioenergia, Bioraffineria e Chimica Verde
Laboratorio Tecnologie e Processi
per le Bioraffinerie e la Chimica Verde
Centro Ricerche Trisaia, Matera

**ANALISI TERMOGRAFICA SU UNA CASSA
MOBILE REFRIGERATA IBRIDA
PER IL RILIEVO DEI PONTI TERMICI**

RT/2017/34/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

T. CARDINALE, P. DE FAZIO

Dipartimento Tecnologie Energetiche
Divisione Bioenergia, Bioraffineria e Chimica Verde
Centro Ricerche Trisaia, Matera

F. GRANDIZIO

Dipartimento Tecnologie Energetiche
Divisione Bioenergia, Bioraffineria e Chimica Verde
Laboratorio Tecnologie e Processi
per le Bioraffinerie e la Chimica Verde
Centro Ricerche Trisaia, Matera

ANALISI TERMOGRAFICA SU UNA CASSA MOBILE REFRIGERATA IBRIDA PER IL RILIEVO DEI PONTI TERMICI

RT/2017/34/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina <http://www.enea.it/it/seguici/pubblicazioni/rapporti-tecnici>

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

ANALISI TERMOGRAFICA SU UNA CASSA MOBILE REFRIGERATA IBRIDA PER IL RILIEVO DEI PONTI TERMICI

T. Cardinale, P. De Fazio, F. Grandizio

Riassunto

L'obiettivo di questo lavoro è effettuare un'analisi termografica di una cassa intermodale refrigerata in modalità ibrida, attiva con il compressore e passiva con le piastre eutettiche, nel corso di un viaggio simulato, allo scopo di rilevare eventuali ponti termici sulle pareti della cassa, in corrispondenza di collegamenti od altre strutture di supporto. La cassa, durante le prove statiche, è stata portata in regime di freddo e quindi è iniziata la simulazione delle diverse fasi del viaggio gomma-nave-treno. I rilievi termografici outdoor della cassa mobile sono stati effettuati pertanto in diversi momenti, significativi del cambio della modalità di funzionamento, da più punti di ripresa, al fine di monitorare tutte le pareti della cassa mobile nelle diverse condizioni di viaggio. In questo rapporto sono riportati i risultati di tale analisi termografica ottenuti confrontando le riprese in digitale della cassa mobile con le relative termografie nelle varie fasi della prova statica.

Parole chiave: Termografia Infrarosso, Ispezione Non-Distruttiva, Ponti Termici, Refrigerazione Ibrida.

Abstract

The objective of this work is to perform thermographic analysis of an intermodal container refrigerated in hybrid mode, active by compressor and passive by eutectic, in the course of a simulated trip, in order to detect any thermal bridges on the walls of the container, in correspondence of links or other support structures. During static test, once the container reached cold conditions, the simulation of the different phases of the road – ship – train trip began. The outdoor thermal images were therefore made at different and significant times, representative of the operating mode change, from several points of recording, in order to monitor all the walls of the container in the different travel conditions. This report shows the results of the thermographic analysis obtained by comparing the digital shootings with its thermal images at various stages of the static test.

Key words: *Infrared Thermography, Non-Destructive Inspection, Thermal Bridges, Hybrid Refrigeration.*

INDICE

1. INTRODUZIONE	7
2. LA TERMOGRAFIA	8
2.1 CARATTERISTICHE GENERALI	8
2.2 PROCEDURA DI MISURA ED ELABORAZIONE DATI	11
2.3 CALIBRAZIONE TERMOCAMERA	13
3. PONTI TERMICI	16
3.1 GENERALITÀ	16
3.2 PROTOCOLLO PROVE STATICHE	17
4. ANALISI TERMOGRAFICA PROVE STATICHE	19
4.1 RIPRESE IN DIGITALE DELLA CASSA MOBILE	20
4.2 REPORT TERMOGRAFICI	22
5. CONCLUSIONI	37
BIBLIOGRAFIA	38

1. INTRODUZIONE

Nell'ambito del Progetto PON PT²-LOG, ENEA in quanto partner del consorzio CETMA, ha svolto varie attività di test di validazione del prototipo dimostratore di cassa mobile realizzato da un partner progettuale.

In particolare il laboratorio DTE-BBC ha svolto come attività, un'analisi termografica nel corso delle prove statiche allo scopo di rilevare eventuali ponti termici sulle pareti della cassa, in corrispondenza di collegamenti od altre strutture di supporto. Tale rapporto tecnico descrive la metodologia di acquisizione delle immagini termografiche e la loro successiva elaborazione.

Nel primo capitolo sono riportate pertanto le caratteristiche della termocamera utilizzata per effettuare le acquisizioni sulla cassa mobile, in dotazione al laboratorio, la descrizione della calibrazione effettuata sulla termocamera stessa e del setup dei parametri adeguati ai requisiti di progetto.

Nel secondo capitolo sono state presentate le modalità di rilevazione dei ponti termici sulla cassa mobile mediante analisi termografica e la descrizione del protocollo relativo alle prove statiche effettuate e redatto in collaborazione con altri partner di progetto.

Il terzo capitolo riporta la descrizione dei risultati delle prove statiche effettuate sulla cassa mobile, nello stabilimento IFAC di Acquaviva delle Fonti (Ba), con il confronto tra le foto acquisite e le termografie effettuate ed elaborate successivamente con software dedicato.

Il rapporto tecnico termina con le conclusioni relative all'analisi termografica effettuata nel corso delle prove statiche sulla cassa mobile.

2. LA TERMOGRAFIA

2.1 CARATTERISTICHE GENERALI

La termografia è una tecnica di misura di tipo non invasivo, effettuata tramite l'acquisizione di immagini nel campo dell'infrarosso al fine di misurare la variazione di temperatura in componenti, strutture, sistemi o processi fisici. L'apparecchiatura utilizzata (termocamera) rileva le temperature superficiali delle aree eccitate mediante sorgente termica naturale (quale l'irraggiamento solare) o artificiale (come lampade ad incandescenza), fornisce mappe a colori (termogrammi) che consentono una rapida localizzazione dei difetti. La strumentazione è costituita da una macchina da ripresa che converte, mediante una fotocellula, la radiazione infrarossa in segnali elettronici, poi amplificati e inviati allo schermo di visualizzazione. La termocamera, permette di visualizzare immagini con toni di grigio, in monocromatico o in falsi colori; l'immagine, che può essere elaborata e salvata in un file, è chiamata termogramma o immagine termica. Questa procedura, risulta particolarmente utile in diversi ambiti: dall'industria siderurgica e dei processi termici all'impiantistica civile, dall'industria elettronica all'impiantistica industriale, fino ad applicazioni nel campo della prevenzione e diagnosi medica [1].

L'energia radiante di un materiale dipende dalla temperatura superficiale, i diversi materiali assumono differenti temperature superficiali in funzione della conduttività termica e del calore specifico, grandezze che caratterizzano l'attitudine del materiale stesso a trasmettere calore o a ritenerlo. Ogni oggetto emette energia dalla propria superficie sotto forma di onde elettromagnetiche, quando queste onde colpiscono un corpo che non sia trasparente, vengono in parte assorbite, e l'energia si trasforma in calore. L'energia E liberata da un corpo sotto forma di radiazione è funzione della lunghezza d'onda secondo la legge di Planck (1):

$$E = hv = hc / \lambda$$

h = costante di Planck = $6,63 \cdot 10^{-34}$ (W · sec²)

c = velocità della luce = $3 \cdot 10^8$ (m/sec)

λ = lunghezza d'onda (μm)

I fenomeni di scambio termico per energia radiante differiscono tra loro in funzione della capacità dei corpi di assorbire e riflettere energia; per semplicità di formulazione, si usa confrontare le caratteristiche dei corpi reali con quelle di un corpo ideale di riferimento denominato *corpo nero*, capace di assorbire la totalità delle radiazioni ricevute. I corpi reali sono in grado invece di assorbire soltanto una parte della radiazione incidente, mentre la parte restante viene comunque riflessa. Lo scambio termico per irraggiamento è influenzato inoltre anche dal mezzo in cui l'onda elettromagnetica si propaga, in quanto questo può assorbire parte dell'energia coinvolta.

Sommando i valori della funzione $E(\lambda, T)$ lungo tutto lo spettro, si ottiene, per il corpo nero, la legge di Stefan-Boltzmann (2):

$$E = \sigma T^4 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

T = temperatura assoluta in °K

σ = costante di Stefan-Boltzmann = $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

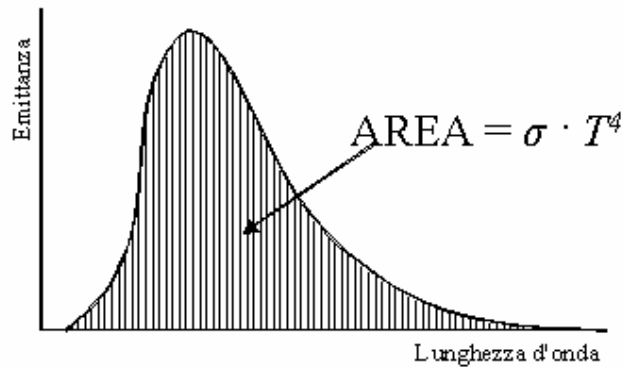


Figura 1: L'area sottesa dalla curva di radiazione del corpo nero è uguale alla relazione di Stefan-Boltzmann

Nello studio dello scambio termico per radiazione è necessario conoscere le caratteristiche di emissione, riflessione e assorbimento dei corpi reali coinvolti: solo se i corpi fossero neri si avrebbero caratteristiche note e definite secondo le predette leggi matematiche. Per semplicità di formulazione, quindi, si usano alcuni coefficienti adimensionali, quali il *fattore di emissività*, che consentono di rapportare le caratteristiche di emissività dei corpi indagati con quella del corpo nero. L'*emissività* è data dal rapporto tra l'energia emessa dal corpo considerato e quella del corpo nero (3), dunque:

$$\varepsilon = E \text{ attuale} / E \text{ corpo nero}$$

ε = fattore di emissività

Eattuale = energia del corpo considerato

Ecorpo nero = energia del corpo nero

Come già accennato, la termocamera è uno strumento in grado di rilevare le temperature dei corpi analizzati, ed è costituito da una componentistica elettro-ottica. La radiazione infrarossa giunge all'obiettivo della termocamera, il flusso viene indirizzato ad un sensore, che genera un impulso. Tale impulso viene amplificato e convertito da segnale analogico a segnale digitale per essere elaborato dal processore elettronico. Il processore associa un numero ad ogni impulso elettrico, che rappresenta la temperatura del corpo, viene così costruita un'immagine digitale in cui ogni pixel corrisponde ad un numero, che rappresenta una certa quantità di calore.

Una successiva riconversione del segnale così elaborato (da digitale ad analogico), permette di associare un'intensità di luminosità ed un colore a ciascun punto dell'immagine, costruendo il termogramma di uscita. La scala dei colori adottata è una falsa scala dove ai colori che tendono al rosso corrispondono temperature sempre più alte, mentre ai colori che tendono al blu temperature più basse. La restituzione dell'immagine può essere prodotta in diverse scale di colori ed elaborata tramite l'uso di programmi specifici. Lo schema di funzionamento della termocamera è rappresentato in figura 2 e figura 3 [2].

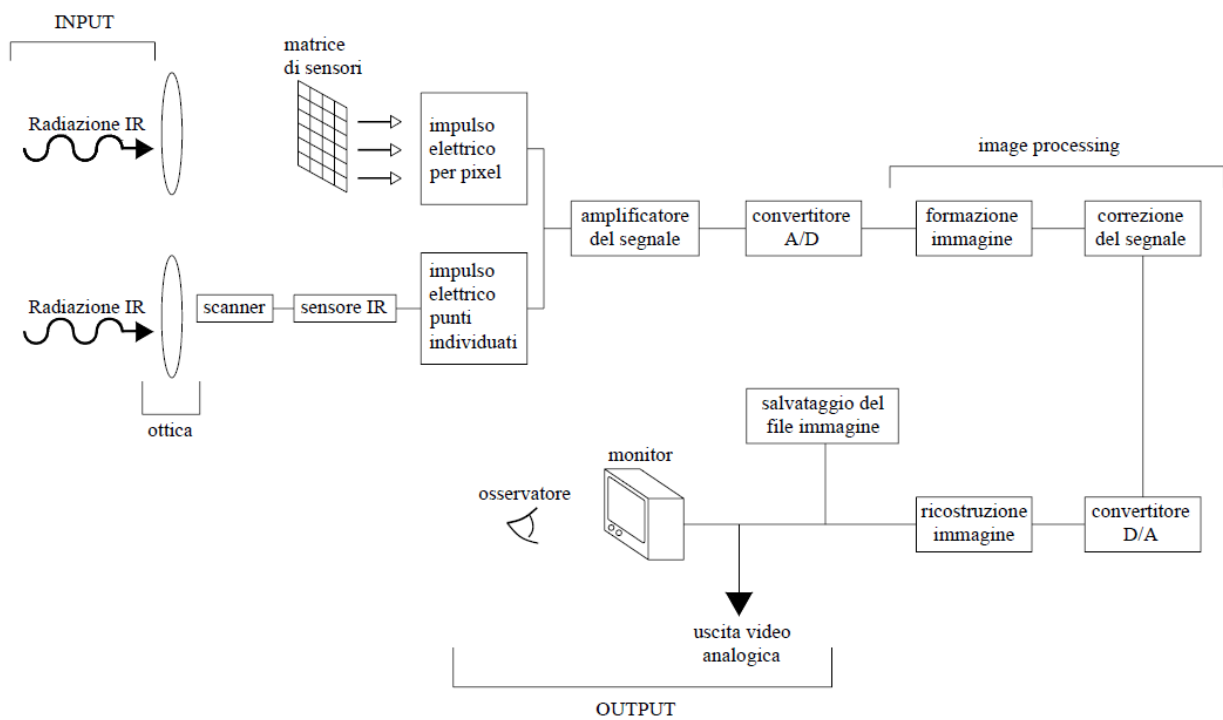


Figura 2: Diagramma a blocchi del funzionamento di una termocamera

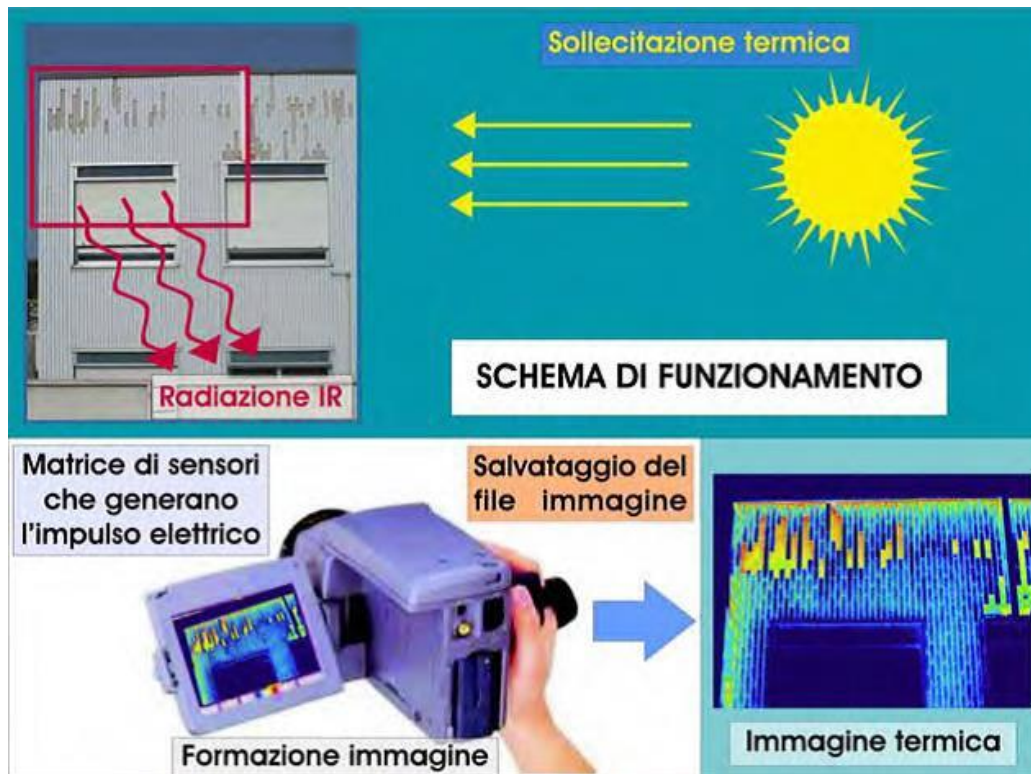


Figura 3: Schema di funzionamento

2.2 PROCEDURA DI MISURA ED ELABORAZIONE DATI

Le tecniche comunemente utilizzate per le indagini termografiche si dividono fondamentalmente in due gruppi: quelle che sfruttano l'energia interna dell'oggetto da esaminare (termografia passiva) e quelle che richiedono sollecitazioni termiche dall'esterno (termografia attiva). Un corpo che è in equilibrio termodinamico con l'ambiente che lo circonda non potrà essere esaminato con la termovisione in quanto non emette nessuna radiazione. La procedura di misura per la tecnica di termografia passiva consiste nell'effettuare delle riprese differite nel tempo con la termocamera nel transitorio termico, dopo aver impostato i parametri sullo strumento. Le immagini termiche vengono salvate dalla termocamera su una scheda compact flash e l'elaborazione delle stesse, in post analisi, avviene su PC con software dedicato. Il software permette di effettuare dei cambi di scala o di usare differenti scale di temperatura/colore, di determinare il valore della temperatura pixel per pixel e di effettuare sottrazioni di immagini, operazioni necessarie per mettere in evidenza anomalie termiche non immediatamente visibili.

Per quanto riguarda l'analisi termografica per la rilevazione dei ponti termici nella cassa, le riprese sono state effettuate utilizzando una termocamera AVIO Neo Thermo TVS-600 in dotazione al laboratorio TEM (Tabella 1). Tale termocamera possiede un rivelatore FPA (Focal Plane Array) microbolometrico senza raffreddamento che opera nella banda spettrale "long wave" tra gli 8 e i 14 μm , che costituisce un intervallo del più ampio spettro dell'infrarosso (compreso fra 0,75 micrometri e 1 millimetro circa). Per quanto concerne la risoluzione spaziale del sistema di acquisizione, il FPA è dotato di una matrice di elementi

sensibili di dimensioni 320(H) x 240(V) con un campo visivo (lente da 35mm) di 25,8°(H) x 19,5°(V) ed è in grado di produrre una risoluzione termica minima pari a 0,15°C (con corpo nero a 30°) con una precisione della temperatura misurata pari a ±4°C nell'intervallo di temperature compreso entro i 100°C (l'intervallo di temperature misurabili è compreso tra -20°C e 150°C) [3].

La tabella successiva riassume in forma schematica quanto espresso:

Rilevatore	FPA (focal-plane-array) microbolometrico bidirezionale senza raffreddamento
Numero degli elementi sensibili del rilevatore	320 (H) x 240 (V)
Campo di messa a fuoco	Da 30 cm a infinito
Lunghezza d'onda rilevabile	8 – 14 µm
Campo visivo (con lente da 35mm)	25,8° (H) x 19,5° (V)
Campo visivo istantaneo (con lente da 35mm)	1,4 mrad
Risoluzione termica minima	0,15 °C (con corpo nero a 30 °C)
Range di emissività	0,10 - 1
Intervallo di temperature misurabile	Intervallo basso: -20 – 150 °C Intervallo alto: -20 – 300 °C
Precisione della temperatura misurata	± 4%
Numero fotogrammi visualizzabili	30 fotogrammi/secondo
Messa a fuoco	Manuale
Tipo di schermo	Pannello incorporato a cristalli liquidi di 5". Uscita per monitor esterno
Formato dell'immagine	File IRI: formato speciale del sistema TVS, File TIF: formato TIFF
Mezzi per la registrazione	Scheda PCMCIA (CompactFlash TM di SanDisk)
I/O esterno	RS – 232C
Condizioni ambientali di utilizzo	Temperatura: da -10°C a +40°C Umidità: max. 90% Vibrazione: 1,0 G (10-150 Hz) Urti: 5 G (11 msec)

Tabella 1: AVIO Neo Thermo serie TVS-600: caratteristiche tecniche

Questo sistema di acquisizione offre, oltre ad una notevole maneggevolezza, una risoluzione spaziale che consente di indagare una zona di dimensioni 14,0 x 13,7 mm ad una distanza di ripresa di 10 metri. Da un punto di vista metodologico le riprese sono state effettuate utilizzando la sorgente solare come stimolo termico analizzando qualitativamente il transitorio che passivamente si crea all'interno dell'involucro per effetto combinato della radiazione solare e dei processi termo-fisici spontanei che interessano la frontiera della cassa mobile (modalità passiva).

Le immagini acquisite sono state successivamente elaborate con un software dedicato (Improtec PE-Analyzer) ottimizzando i valori di emissività ed uniformando gli intervalli di temperatura al fine di poter essere analizzate ed eventualmente successivamente unite in fotomosaici più complessi in grado di restituire in modo unitario intere porzioni della cassa mobile. Le principali funzioni del software sono:

- a) caratterizzazione di profili termici orizzontali, verticali e liberi;
- b) indicazione digitale della temperatura in più punti dell'immagine;
- c) istogrammi, diagrammi temporali delle variazioni termiche di un punto;
- d) isoterme, variazione dell'emissività post-acquisizione.

2.3 CALIBRAZIONE TERMOCAMERA

Una volta verificata la corrispondenza tra le caratteristiche della termocamera ed i requisiti richiesti per l'effettuazione dell'analisi termografica delle pareti della cassa mobile, si è proceduto alla calibrazione della termocamera. Per fare questo si è riprodotto in laboratorio il punto triplo dell'acqua (0,01 °C), dove si realizza l'equilibrio tra i tre stati (ghiaccio, acqua liquida e vapore acqueo), misurato con PT100 di riferimento e contestualmente sono state effettuate riprese con la termocamera al fine di verificare le temperature dell'immagine termografica acquisita. Di seguito sono riportate la foto di un tubo Dewar in cui è stato raggiunto il punto triplo dell'acqua, l'immagine termografica e l'istogramma relativo alle temperature acquisite (fig.4).

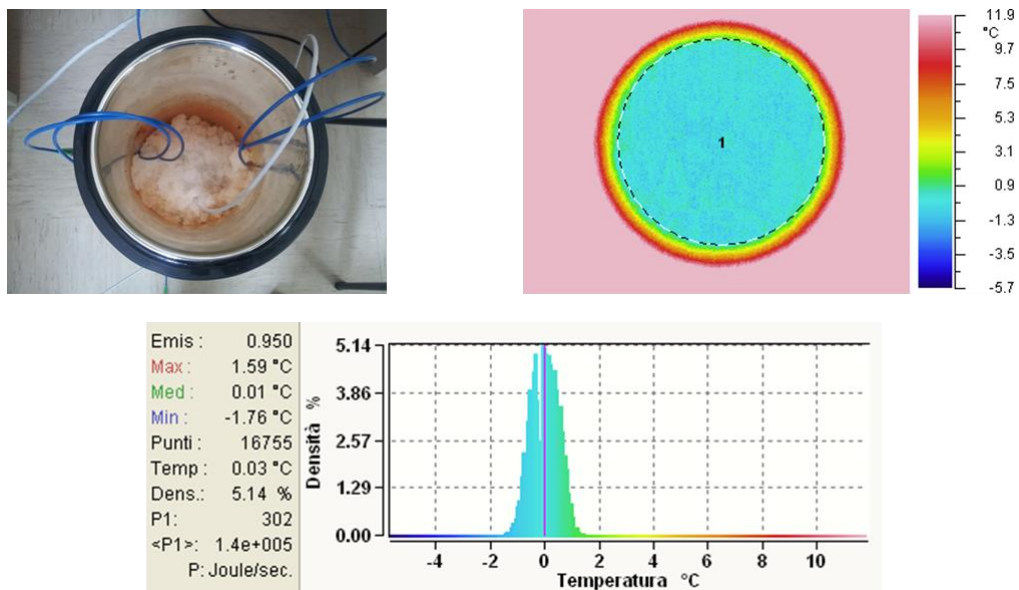


Figura 4: Foto, immagine termografica e relativo istogramma punto triplo dell'acqua

Successivamente si sono riprodotte in laboratorio le stesse temperature operanti nella cassa mobile oggetto della sperimentazione prima in regime fresco (+5°C) e poi in regime freddo (-20°C) e sono state acquisite immagini termografiche di tali temperature raggiunte con strumentazione presente nel laboratorio TEM ed esattamente con un termocriostato di circolazione Julabo FP88 con temperatura operativa compresa nell'intervallo da -88°C a +100°C. Di seguito sono riportate le foto del termocriostato che ha raggiunto la temperatura di +5°C, le relative immagini termografiche acquisite e il relativo istogramma delle temperature (fig.5).

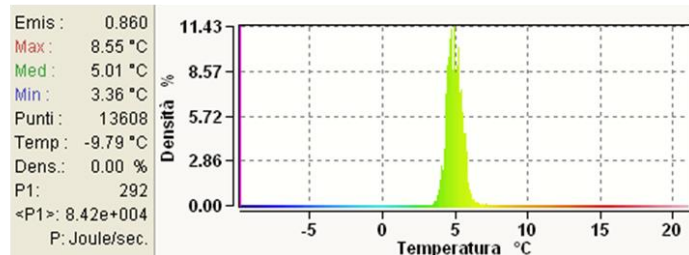
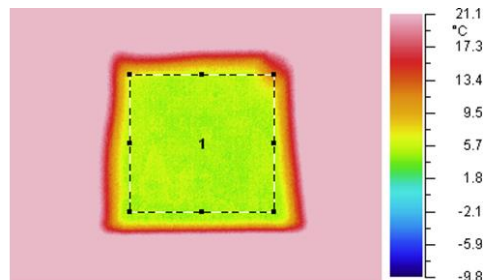
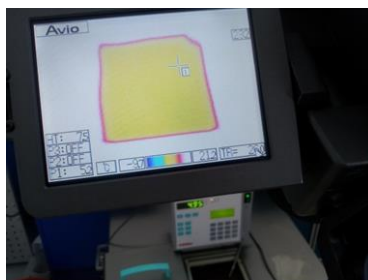
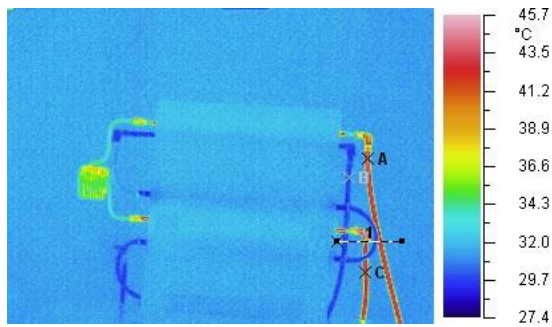


Figura 5: Foto, immagine termografica, istogramma termocriostato

Al fine di settare i parametri di acquisizione della termocamera a disposizione del Laboratorio TEM e del relativo software di elaborazione corredato, è stata elaborata un'applicazione simile a quella di rilevazione dei ponti termici sulle pareti della cassa. Pertanto è stata realizzata una parete in cartongesso ricoperta di uno strato superficiale di intonaco all'interno della quale sono state inserite delle tubazioni in cui circola acqua fredda (circa 30°C) e acqua calda sanitaria riscaldata tramite caldaia (circa 43°C). Sono state pertanto acquisite immagini termografiche di tale parete così realizzata, al fine di rilevare le differenze di temperatura dell'acqua circolante nei tubi e lo scambio termico tra i tubi stessi e la parete. Sono riportati nella figura seguente (fig.6) l'immagine della parete ripresa con la termocamera e il report elaborato mediante il software di acquisizione della termocamera con le temperature rilevate in più punti di acquisizione corrispondenti alla temperatura dell'acqua fredda (punto B) e alla temperatura dell'acqua calda all'ingresso (punto A) e all'uscita della parete (punto C).



NomeFile :	49010003_1.IRI
Data :	01.09.2014
Tempo :	15:30:38
Max. temp :	45.75
Min. temp :	27.44
Temp Amb. :	29.00
Sensibilità :	0.07
Emissività :	0.91

A	43.93 °C	E = 0.91
B	29.71 °C	E = 0.91
C	42.66 °C	E = 0.91

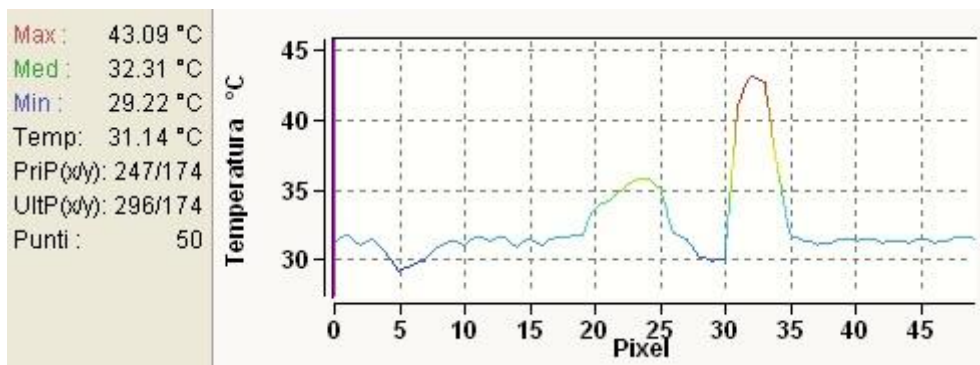


Figura 6: Foto, immagine termografica, istogramma parete

3. PONTI TERMICI

3.1 GENERALITÀ

Per quanto riguarda la nostra applicazione l'analisi termografica è indirizzata alla rilevazione di eventuali ponti termici presenti sulle pareti della cassa mobile.

La fase di analisi e di monitoraggio del comportamento termico dell'involucro prevede l'individuazione delle criticità energetico-costruttive della struttura interessata: in questo senso, l'indagine tramite strumentazione termografica permette di identificare facilmente le zone con ponti termici di rilievo. Il ponte termico, come noto, è quella parte di una struttura che presenta caratteristiche termiche significativamente diverse da quelle circostanti, generando flussi di calore più rapidi e costituendo quindi una via privilegiata per gli scambi di calore da e verso l'esterno. Per ponti termici precisamente si intendono quelle zone, limitate in termini di superficie, dove si verificano disomogeneità del materiale e variazioni di forma. In queste zone si verificano effetti perturbativi locali e una variazione delle temperature superficiali interne, con conseguente incremento della conduttanza termica e della quantità di calore disperso attraverso le pareti.

I principali effetti negativi sono:

- raffreddamento delle zone prossime al ponte termico, con conseguente creazione di condensa e quindi di muffe;
- riduzione del potere isolante complessivo della parete, con conseguente aumento dei consumi.

È possibile definire il ponte termico come quella configurazione strutturale o geometrica che produce una deviazione del flusso termico dalla condizione di flusso monodimensionale tra le superfici interna ed esterna di una parete, per cui generalmente è possibile riscontrare:

- presenza di eterogeneità di forma (angoli e spigoli): la presenza di pareti concorrenti in un angolo o in uno spigolo causa la formazione di un campo termico bidimensionale, con un incremento del flusso termico specifico in concomitanza dello spigolo concavo (interno), ove si registra un addensamento delle isoterme;
- presenza di eterogeneità di struttura (pilastri in calcestruzzo all'interno di murature in laterizi) e diffuse (presenza di materiali anisotropi, camere d'aria o giunti di malta): la presenza di materiali differenti provoca una perturbazione del flusso termico, il quale assume componenti dirette lungo tutte e tre le direzioni ortogonali nello spazio; la distorsione del flusso termico provoca disomogeneità di temperatura sulle superfici interne delle pareti.

Per il calcolo analitico del flusso termico trasmesso dalla parete in presenza di un ponte termico esistono due possibilità:

- utilizzare un metodo di calcolo numerico 2D o 3D per calcolare il flusso termico complessivamente scambiato e la distribuzione dei valori effettivi delle temperature sia superficiali che interne alla parete;
- utilizzare un metodo semplificato che, sfruttando il principio di sovrapposizione degli effetti, consente di calcolare l'incremento di flusso termico dovuto alla presenza del ponte termico.

Il metodo semplificato consiste nella determinazione di coefficienti di trasmissione lineari (lineici), esprimenti il flusso termico disperso, che compete alle zone singolari per ogni metro di lunghezza e per una differenza di temperatura unitaria fra interno ed esterno: l'incremento di flusso termico, rispetto a quello calcolato nell'ipotesi monodimensionale, viene concentrato nella singolarità definita da una dimensione lineare.

Pertanto, negli interventi di diagnosi e riqualificazione energetica, risulta fondamentale innanzitutto individuare e mappare in modo preciso questo tipo di criticità, in maniera tale da predisporre interventi mirati al risparmio energetico.

L'indagine termografica, grazie alla facile individuazione dei delta termici, permette quindi alle imprese di settore nonché ai professionisti chiamati a sviluppare progetti, di offrire un servizio ad elevato contenuto tecnologico e di ottenere una visione oggettiva delle criticità, e costituisce il primo ed indispensabile passo per una corretta interpretazione delle eventuali dispersioni termiche in atto, al quale poi eventualmente far seguire una fase di calcolo ad hoc per la valutazione dei flussi termici [4].

3.2 PROTOCOLLO PROVE STATICHE

Per quanto riguarda l'analisi termografica, allo scopo di rilevare eventuali ponti termici è stato redatto in collaborazione con altri partner di progetto un protocollo di prove statiche da effettuare. Tale protocollo di test statici ha l'obiettivo di valutare sperimentalmente l'efficacia della soluzione sviluppata e prototipata, di valutare eventuali carenze e trarre spunti tecnici da considerare nella fase di scale-up tra il prototipo ed il modello industriale. Tali test statici sono avvenuti presso lo stabilimento IFAC di Acquaviva delle Fonti (Ba), senza carico di merce all'interno della cassa, in regime di freddo, monitorando la temperatura in sei diversi punti interni (2 per l'eutettico e 4 per le pareti) e uno esterno alla cassa.

Il primo test ha avuto come obiettivo la verifica dell'efficacia con cui il gruppo frigorifero Thermoking riesce a congelare le piastre eutettiche. Le condizioni iniziali del test sono state:

- piastre eutettiche sono completamente scongelate;
- temperatura e le condizioni termodinamiche all'interno della cassa sono quelle ambientali.

Le piastre eutettiche erano state preliminarmente caricate per tutta la giornata di lunedì 2 Marzo 2015. Il giorno successivo, 3 marzo, una volta verificato il raggiungimento locale della temperatura di congelamento (-33°C), si è misurato il tempo necessario per portare le piastre da una situazione di scioglimento totale ad

una situazione di congelamento totale (24 h) e si è effettuata un'analisi termografica outdoor per rilevare eventuali ponti termici della cassa.

Ora, in queste condizioni, la cassa è stata ritenuta pronta e idonea ad iniziare il secondo test, riguardante un viaggio simulato Vittoria-Rotterdam come da protocollo (tabella 2).

Viaggio intermodale	km	h	Velocità [km/h]	Modo	Fonte di energia
Centrale agrumicola Vittoria - Catania	98	1,6	60	gomma	gasolio
Imbarco		2			nessuna fonte
Catania - Napoli		12		nave	elettricità
Sbarco		1			nessuna fonte
Porto Napoli - Marcianise terminal	33	0,55	60	gomma	gasolio
Movimentazione gomma treno a Marcianise		1,5			nessuna fonte
Marcianise - Rotterdam	1814	63	29	treno	gasolio (solo se necessario)
Movimentazione gomma treno a Rotterdam		1,5			nessuna fonte
Consegna entro 250 km su gomma	max 250	4	60	gomma	gasolio

Tabella 2: Viaggio intermodale simulato

Di conseguenza il test è stato effettuato accendendo e spegnendo il gruppo Thermoking secondo opportuni intervalli temporali dettati dalle varie fasi del viaggio simulato.

Martedì 3 alle ore 7:30 è partito il countdown per la simulazione di viaggio.

Per tutte le operazioni previste nelle prime fasi del viaggio, come atteso, la cassa ha lavorato in modalità solo passiva, ovvero la temperatura interna è rimasta sempre adeguata (inferiore a -21°C) e non è mai stato necessario l'intervento del compressore, tanto più che c'è stata la fase di ricarica da rete elettrica durante il tragitto su nave.

Alle ore 18:30 circa di martedì 3 è iniziata la fase su treno in modalità ibrida: il compressore iniziava a ricaricare le piastre quando la temperatura interna era maggiore di -21°C e smetteva quando la temperatura interna era minore di -24°C . Questa modalità è durata sino alla fine del test, venerdì 6 alle ore 14:30.

Per garantire le suddette condizioni termiche il compressore ha lavorato per circa il 50% del tempo, con cicli di circa 20' ON e 20' OFF. Il motore diesel girava comunque a regime ridotto in quanto naturalmente doveva raffreddare un ambiente già freddo.

Durante tutta la fase del viaggio simulato, sono state effettuate altre riprese termografiche nei momenti più significativi (inizio e fine ricarica da rete elettrica, inizio e fine modalità ibrida) nell'ottica di rilevare eventuali ponti termici generati nel corso del viaggio simulato. Un report dettagliato su queste termografie verrà presentato nel terzo capitolo di questo rapporto tecnico.

4. ANALISI TERMOGRAFICA PROVE STATICHE

Le riprese termografiche della cassa mobile, sono avvenute all'interno di un capannone dello stabilimento IFAC di Acquaviva delle Fonti (Ba). Sono riportate di seguito le riprese in digitale della cassa mobile dai diversi punti di osservazione e le relative termografie nelle varie fasi della prova [5].

Nei report termografici sono indicati, tra gli altri, il valore dell'emissività per la superficie esterna delle pareti della cassa mobile pari a 0.90, come riscontrato in letteratura, e il valore della temperatura ambiente rilevato dalla termocamera [6].

Nella figura 7 è riportata la pianta della stessa con l'individuazione dei punti da cui sono state effettuate le riprese.

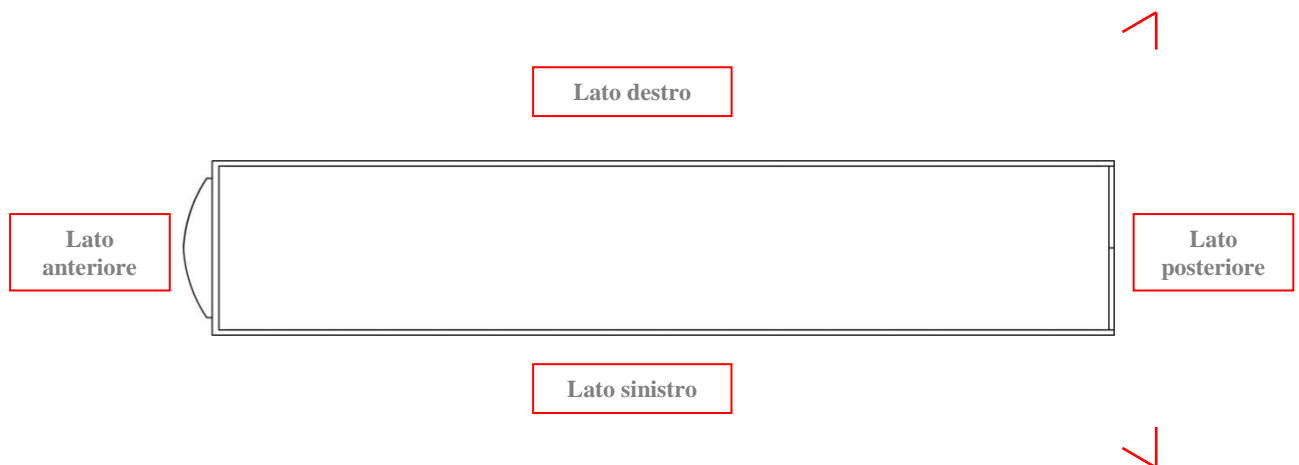


Figura 7: Pianta della cassa mobile con indicazione dei punti di ripresa

4.1. RIPRESE IN DIGITALE DELLA CASSA MOBILE

Di seguito sono riportate le riprese in digitale delle condizioni al contorno della prova con la perimetrazione delle aree della cassa rilevate.



Figura 8: Lato sinistro-lato anteriore (compressore)



Figura 9: Lato posteriore (porte)



Figura 10: Alcuni momenti del rilievo termografico



Figura 11: Interno della cassa, in cui si evidenzia la posizione delle piastre eutettiche e delle sonde di misurazione della temperatura

4.2 REPORT TERMOGRAFICI

Data e ora del rilievo: 3 marzo 2015 ore 8_Avvio fase: modalità passiva

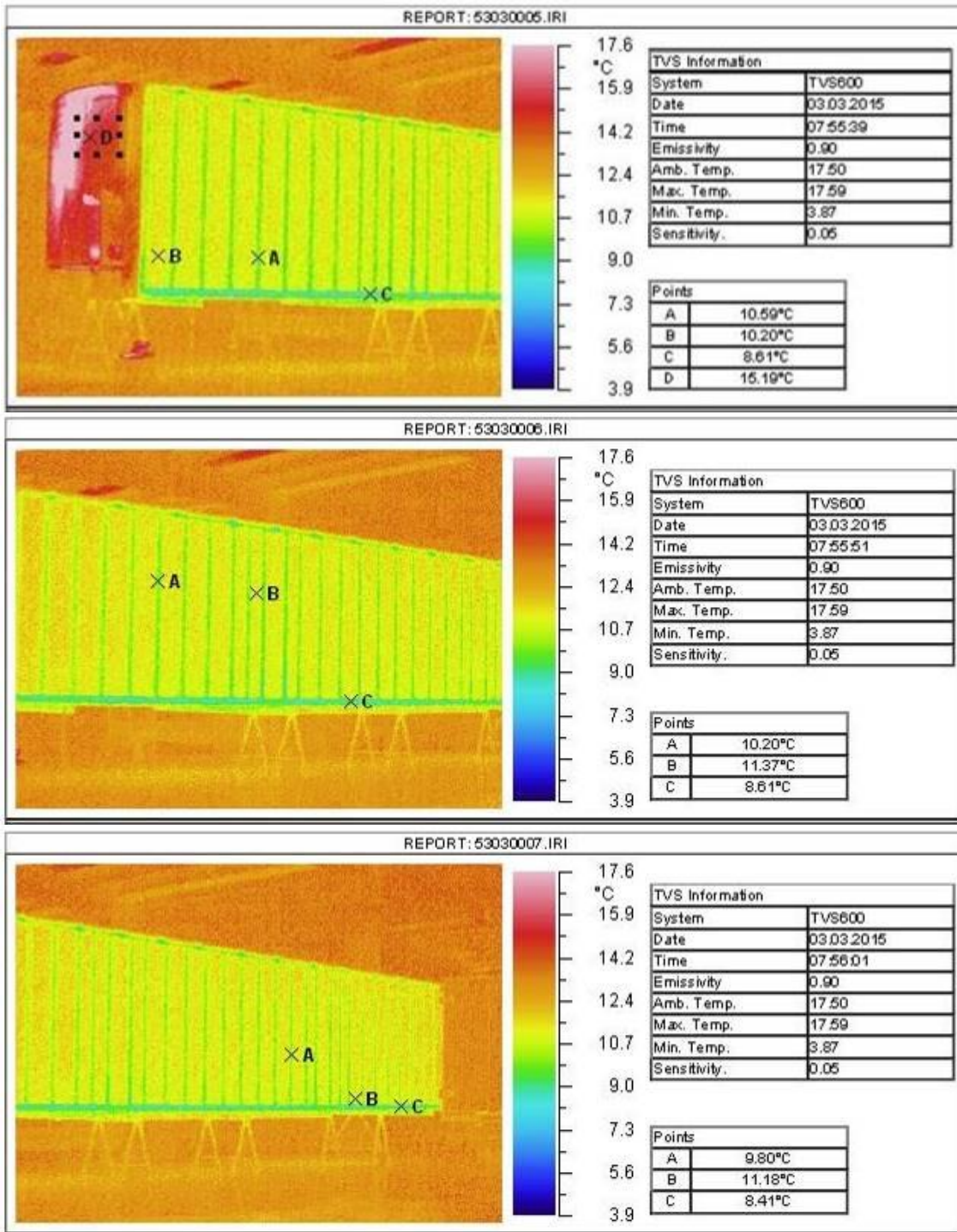


Figura 12: Termografia lato sinistro-lato anteriore (compressore) fase modalità passiva

Si evidenzia la pelle esterna dei pannelli sandwich coibentanti composta da laminati di vetroresina (B) e la struttura interna di travi rivestite in fibre di vetro (A-C). Il compressore è evidenziato dal punto D. Delta termico oscilla fra 2-3 °C (come si riscontra dalle temperature rilevate nei punti A-B-C), un range assolutamente nella norma [7][8].

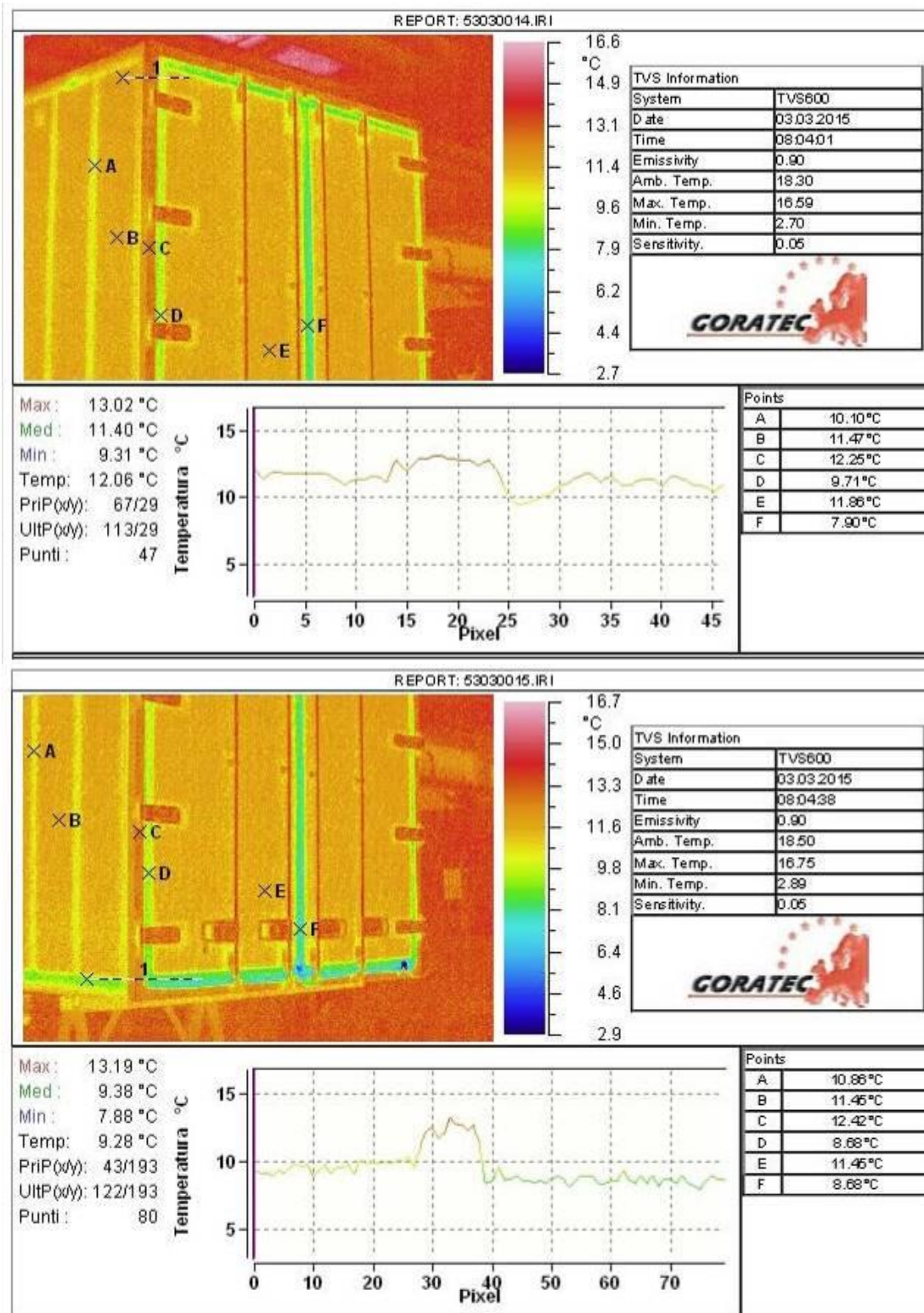


Figura 13: Termografia lato posteriore (porte) ripresa da sinistra fase modalità passiva

Si evidenziano i diversi materiali di cui è composto il portale posteriore: guarnizione in gomma (D-F), profilo perimetrale in alluminio anodizzato (C), pannelli vetroresina (A-E), travi rivestite in fibre di vetro (B). Delta termico di 3-4 °C, come si riscontra dalle temperature rilevate nei punti C-D-F e dal profilo termico (1) lungo lo spigolo, che rappresenta una zona critica. Le oscillazioni termiche sono confacenti alla diversità dei materiali presenti, per cui non vi sono discontinuità materiche e geometriche, ossia non vi sono ponti termici.

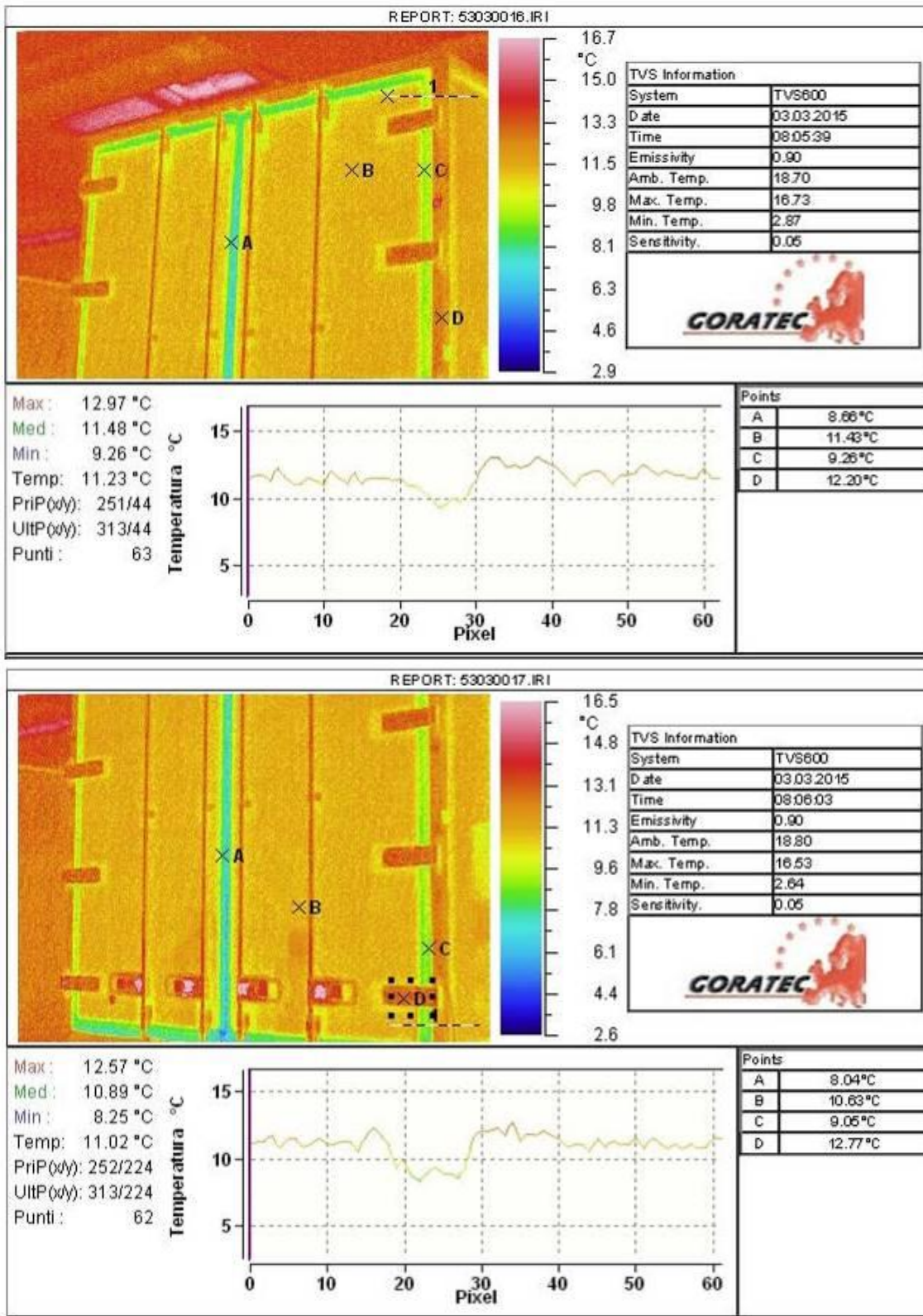


Figura 14: Termografia lato posteriore (porte) ripresa da destra fase modalità passiva

Si evidenziano i diversi materiali di cui è composto il portale posteriore: guarnizione in gomma (A-C), pannelli in vetroresina (B), profilo perimetrale in alluminio anodizzato e chiusure posteriori (D). Delta termico di 3-4 °C, come si riscontra dalle temperature rilevate nei punti A-C-D e dal profilo termico (1) lungo lo spigolo, che rappresenta una zona critica. Le oscillazioni termiche sono confacenti alla diversità dei materiali presenti, per cui non vi sono discontinuità materiche e geometriche, ossia non vi sono ponti termici.

Data e ora del rilievo: 3 marzo 2015 ore 12.30_Avvio fase: modalità elettrica

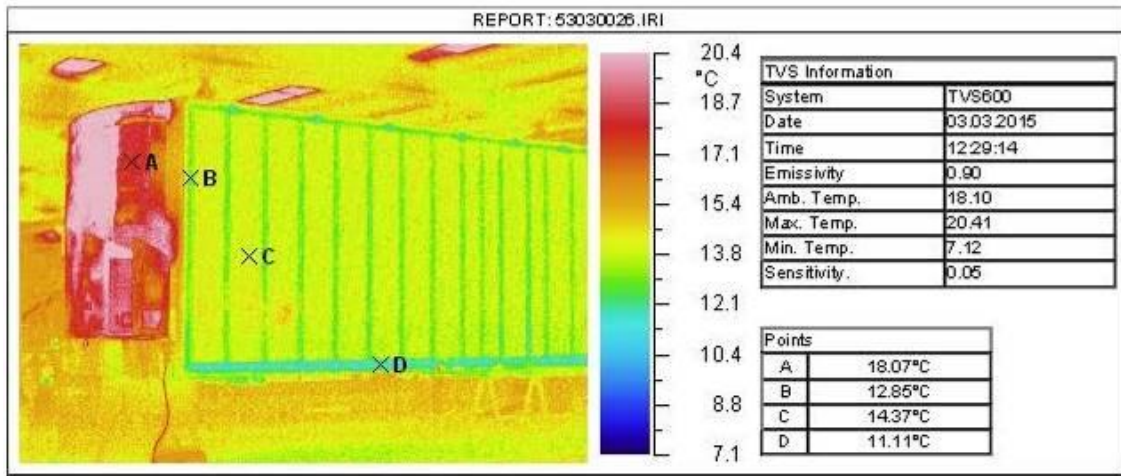


Figura 15: Termografia lato sinistro-lato anteriore (compressore) fase modalità elettrica

Si evidenzia la pelle esterna dei pannelli sandwich coibentanti composta da laminati di vetroresina (C), struttura interna di travi rivestite in fibre di vetro (B-D), compressore (A). Delta termico oscilla attorno a 3 °C (come si riscontra dalle temperature rilevate nei punti B-C-D), un range assolutamente nella norma.

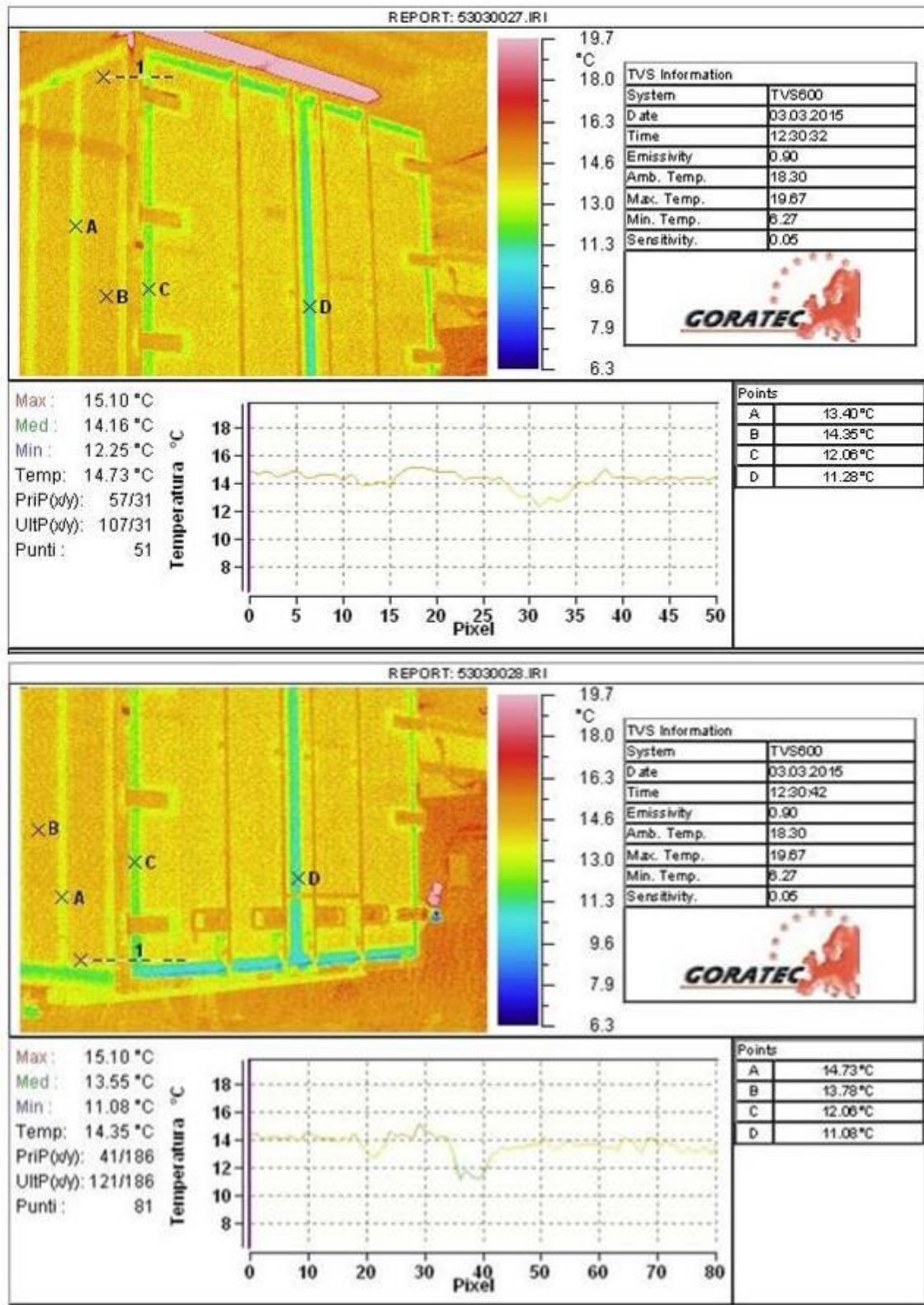


Figura 16: Termografia lato posteriore (porte) ripresa da sinistra fase modalità elettrica

Si evidenziano anche qui i diversi materiali di cui è composto il portale posteriore: guarnizione in gomma (C-D), travi rivestite in fibre di vetro (A) e laminati di vetroresina (B). Delta termico pari a 1 °C, come si riscontra dalle temperature rilevate nei punti C-D e dal profilo termico (1) lungo lo spigolo, che rappresenta una zona critica. Le oscillazioni termiche sono confacenti alla diversità dei materiali presenti, per cui non vi sono discontinuità materiche e geometriche, ossia non vi sono ponti termici.

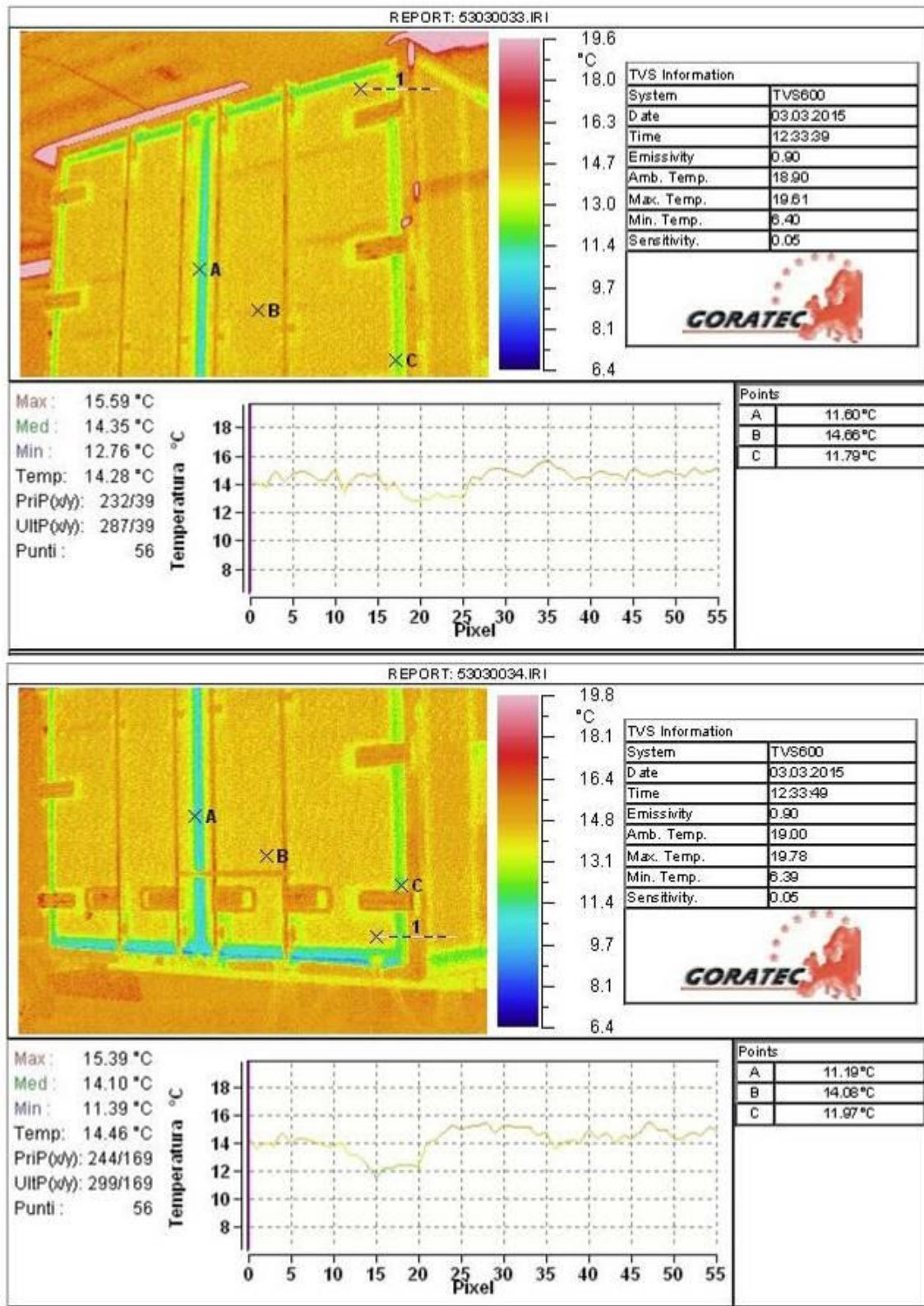


Figura 17: Termografia lato posteriore (porte) ripresa da destra fase modalità elettrica

Si evidenziano i diversi materiali di cui è composto il portale posteriore: guarnizione in gomma (A-C), laminati di vetroresina (B). Delta termico pari a circa 1 °C, come si riscontra dalle temperature rilevate nei punti A-C e dal profilo termico (1) lungo lo spigolo, che rappresenta una zona critica. Non vi sono ponti termici. Sono presenti molteplici riflessioni termiche in fase di rilievo a causa dei lucernari sul soffitto.

Data e ora del rilievo: 3 marzo 2015 ore 15.30_Avvio fase: modalità passiva

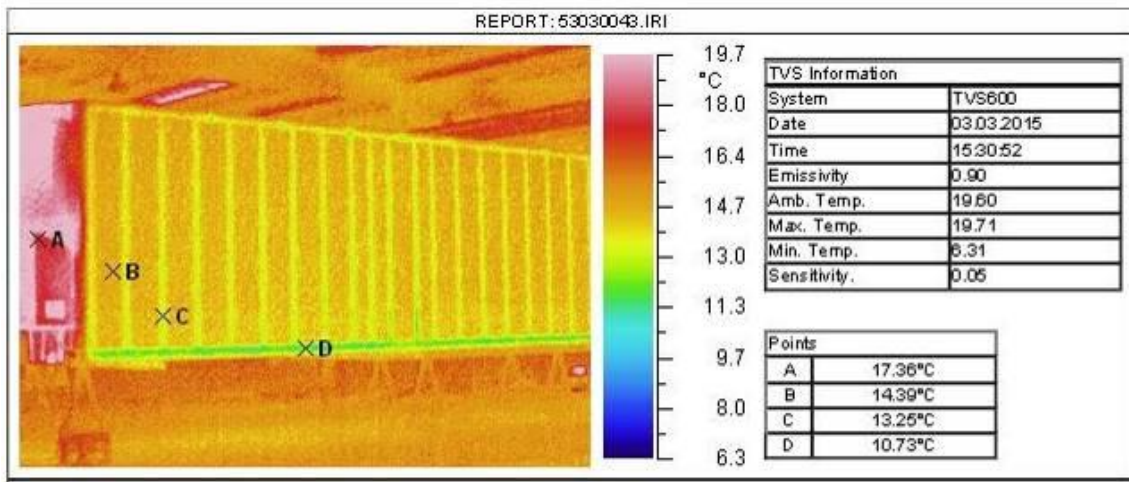


Figura 18: Termografia lato sinistro-lato anteriore (compressore) fase modalità passiva

Si evidenzia la pelle esterna dei pannelli sandwich coibentanti composta da laminati di vetroresina (B), la struttura interna di travi rivestite in fibre di vetro (C-D), e il compressore (A). Delta termico oscilla attorno a 3 °C (come si riscontra dalle temperature rilevate nei punti B-C-D), un range assolutamente nella norma.

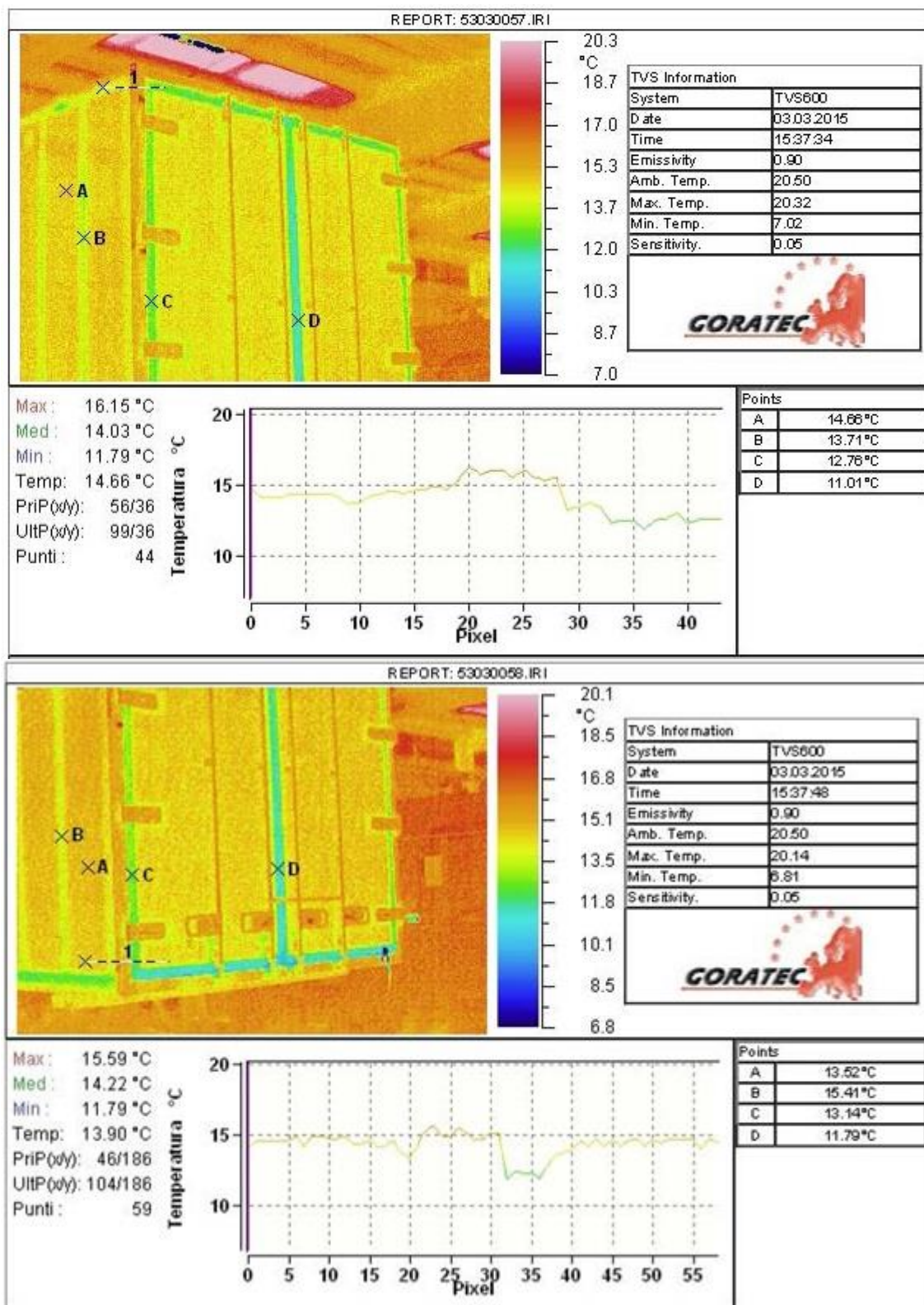


Figura 19: Termografia lato posteriore (porte) ripresa da sinistra fase modalità passiva

Si evidenziano i diversi materiali di cui è composto il portale posteriore: guarnizione in gomma (C-D), laminati di vetroresina (A), la struttura interna di travi rivestite in fibre di vetro (B). Delta termico di circa 2 °C, come si riscontra dalle temperature rilevate nei punti B-C e dal profilo termico (1) lungo lo spigolo, che rappresenta una zona critica. Non vi sono pertanto ponti termici.

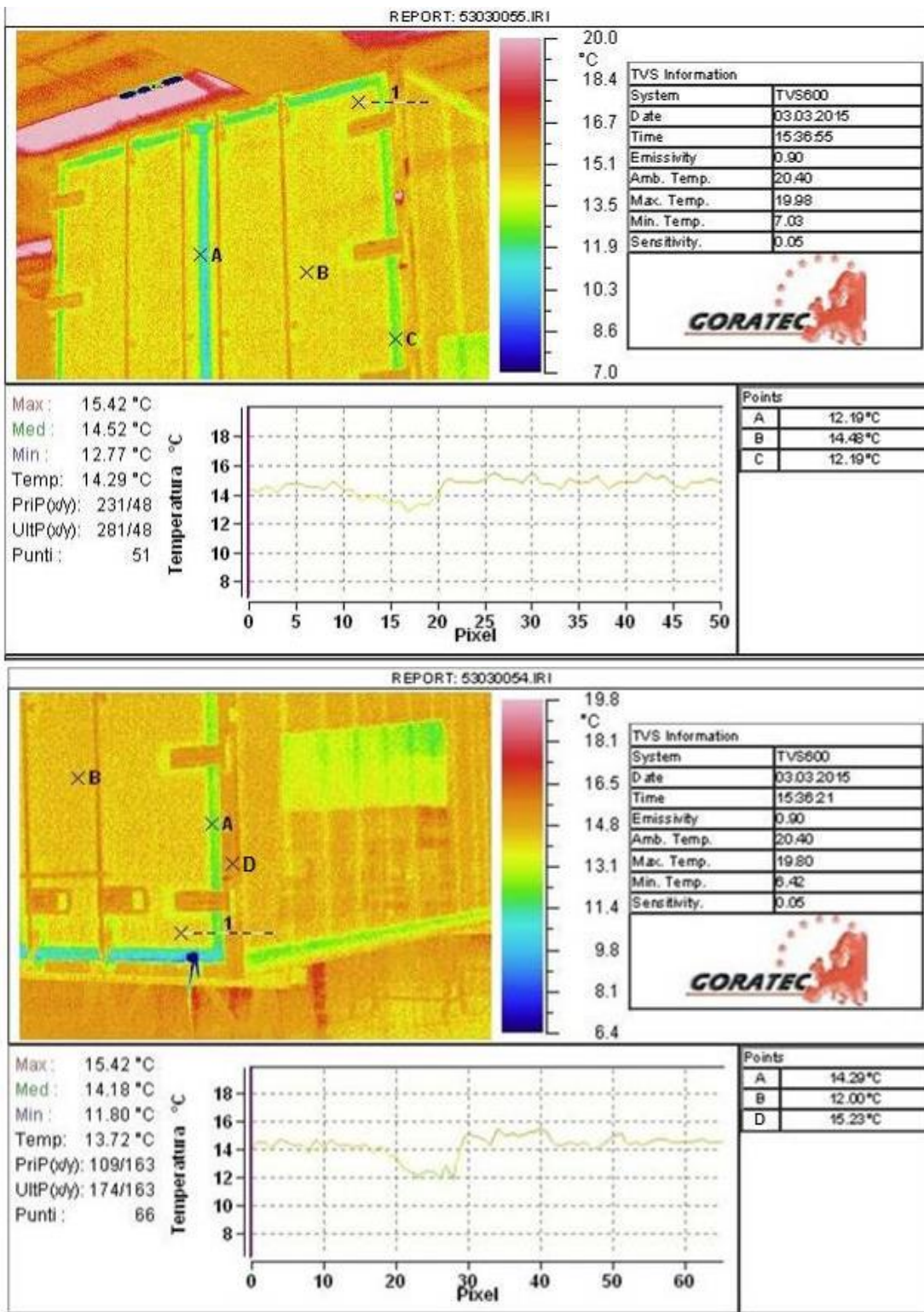


Figura 20: Termografia lato posteriore (porte) ripresa da destra fase modalità passiva

Le considerazioni fatte per la ripresa da sinistra valgono anche per la ripresa da destra (A-C gomma, B vetroresina, D profilo alluminio anodizzato). In questo caso inoltre si evidenzia una temperatura di circa 8 °C (blu scuro) nella zona della guarnizione in basso a destra, in quanto la stessa si trova leggermente sollevata per il passaggio del cavo. Evidentemente è sede di una dispersione termica e ci fa intendere quale sarebbe stato, localmente, l'aspetto dei ponti termici, se mai ne avessimo rilevato qualcuno. Sono presenti molteplici riflessioni termiche in fase di rilievo a causa dei lucernari sul soffitto.

Data e ora del rilievo: 3 marzo 2015 ore 18.30_Avvio fase: modalità ibrida

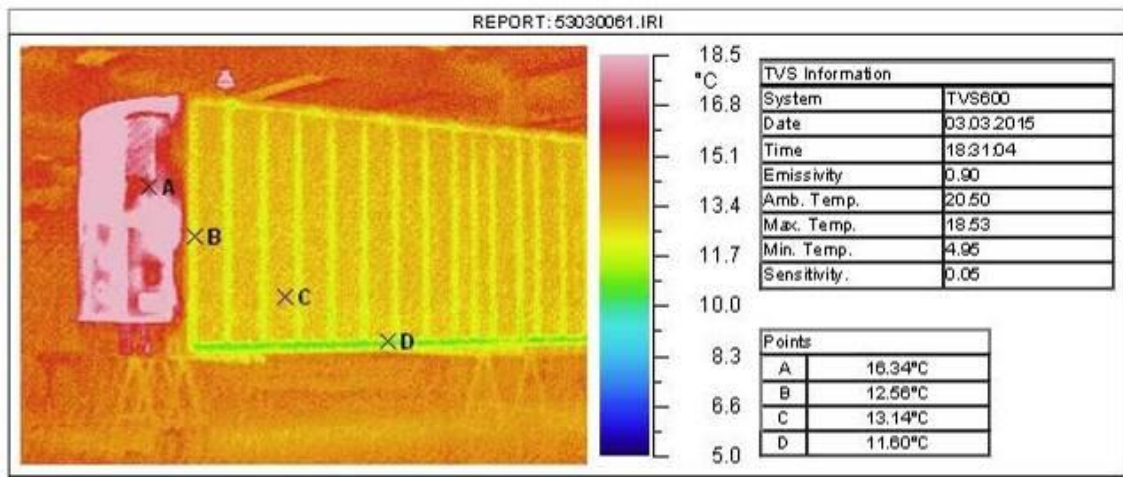


Figura 21: Termografia lato sinistro-lato anteriore (compressore) fase modalità ibrida

Si evidenzia la pelle esterna dei pannelli sandwich coibentanti composta da laminati di vetroresina (C), la struttura interna di travi rivestite in fibre di vetro (B-D), compressore (A). Delta termico oscilla fra 2-3 °C (come si riscontra dalle temperature rilevate nei punti B-C-D), un range assolutamente nella norma.

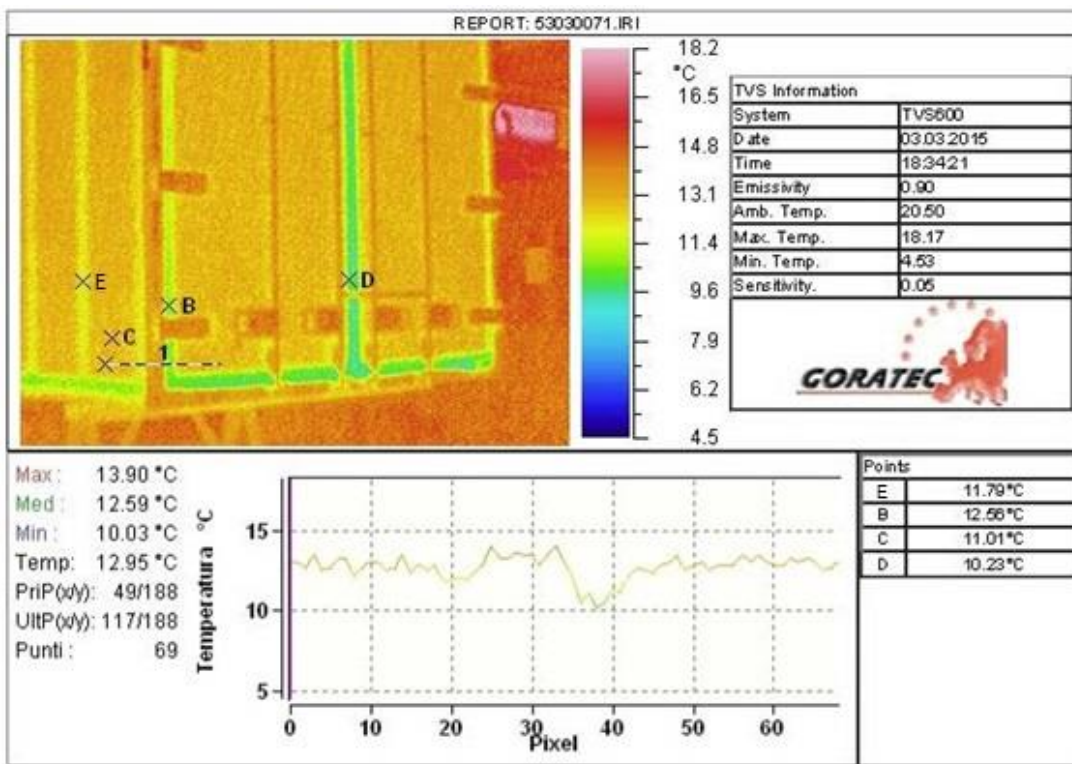
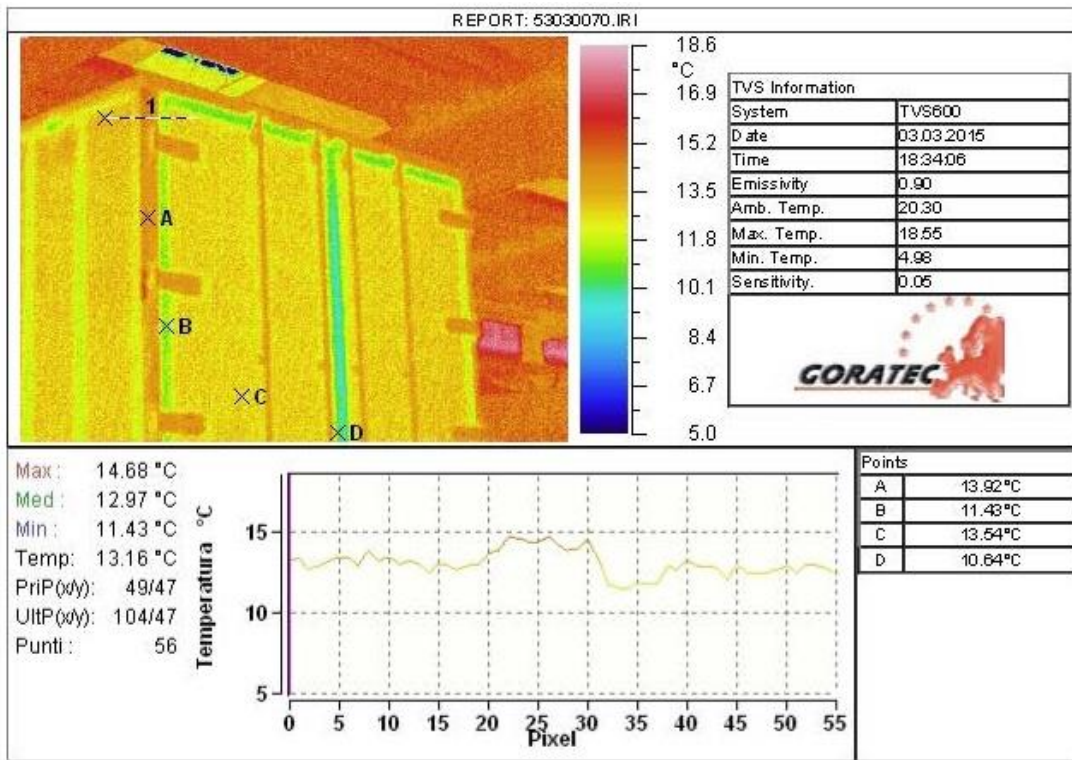


Figura 22: Termografia lato posteriore (porte) ripresa da sinistra fase modalità ibrida

Si evidenziano i diversi materiali di cui è composto il portale posteriore: guarnizione in gomma (B-D), profilo perimetrale in alluminio anodizzato (A), laminati in vetroresina (C) e travi rivestite in fibre di vetro (E). Delta termico di 0.5 °C come si riscontra dalle temperature rilevate nei punti C-D e dal profilo termico (1) lungo lo spigolo, che rappresenta una zona critica. Oscillazioni termiche sono confacenti alla diversità dei materiali presenti, per cui non vi sono discontinuità materiche e geometriche, ossia non vi sono ponti termici.

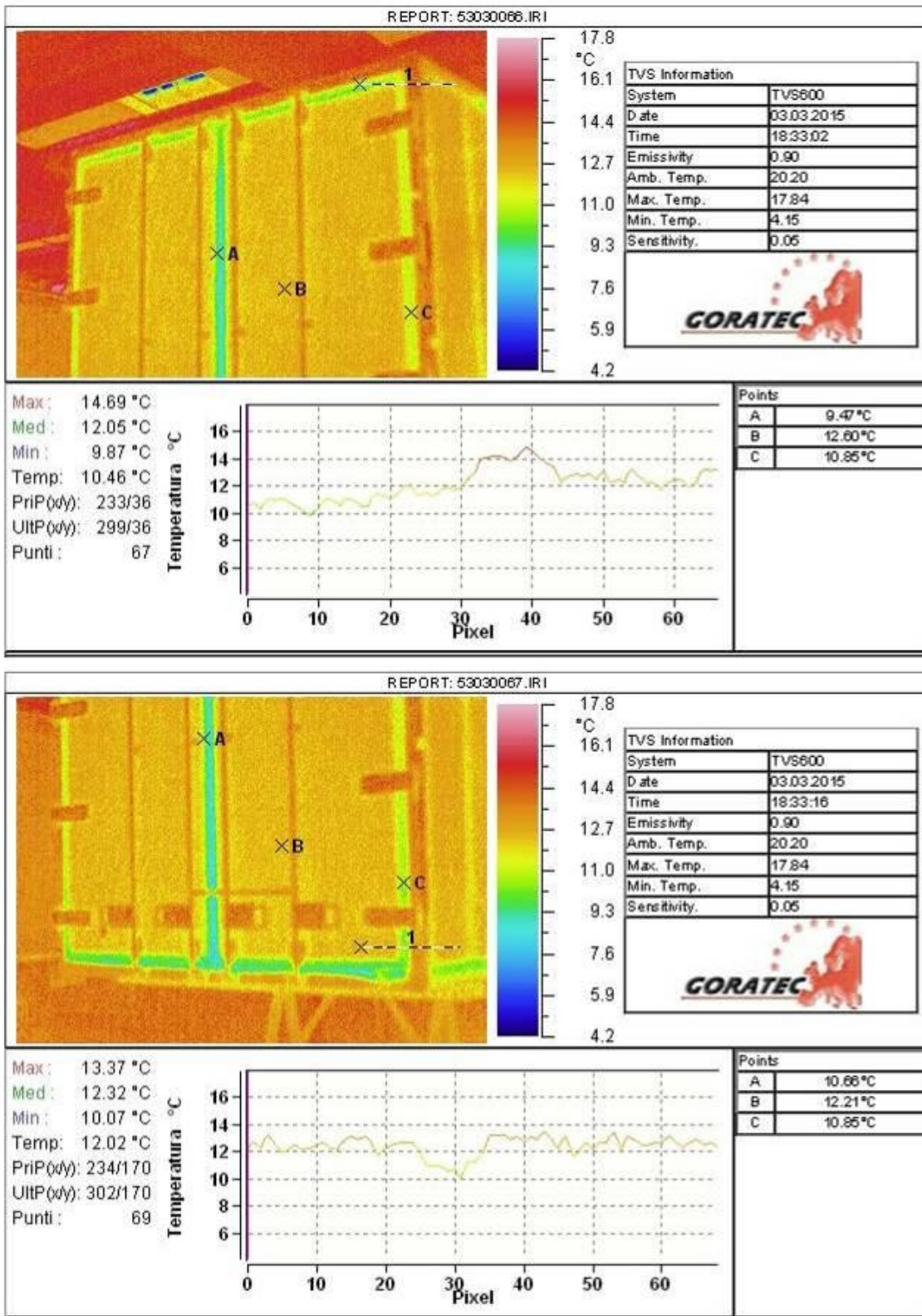


Figura 23: Termografia lato posteriore (porte) ripresa da destra fase modalità ibrida

Si evidenziano i diversi materiali di cui è composto il portale posteriore: guarnizione in gomma (A-C), pannelli in vetroresina (B). Delta termico di 0.5 °C come si riscontra dalle temperature rilevate nei punti A-C e dal profilo termico (1) lungo lo spigolo, che rappresenta una zona critica. Le oscillazioni termiche sono confacenti alla diversità dei materiali presenti, per cui non vi sono discontinuità materiche e geometriche, ossia non vi sono ponti termici.

Data e ora del rilievo: 6 marzo 2015 ore 14.30 **Fine prova:** apertura porte

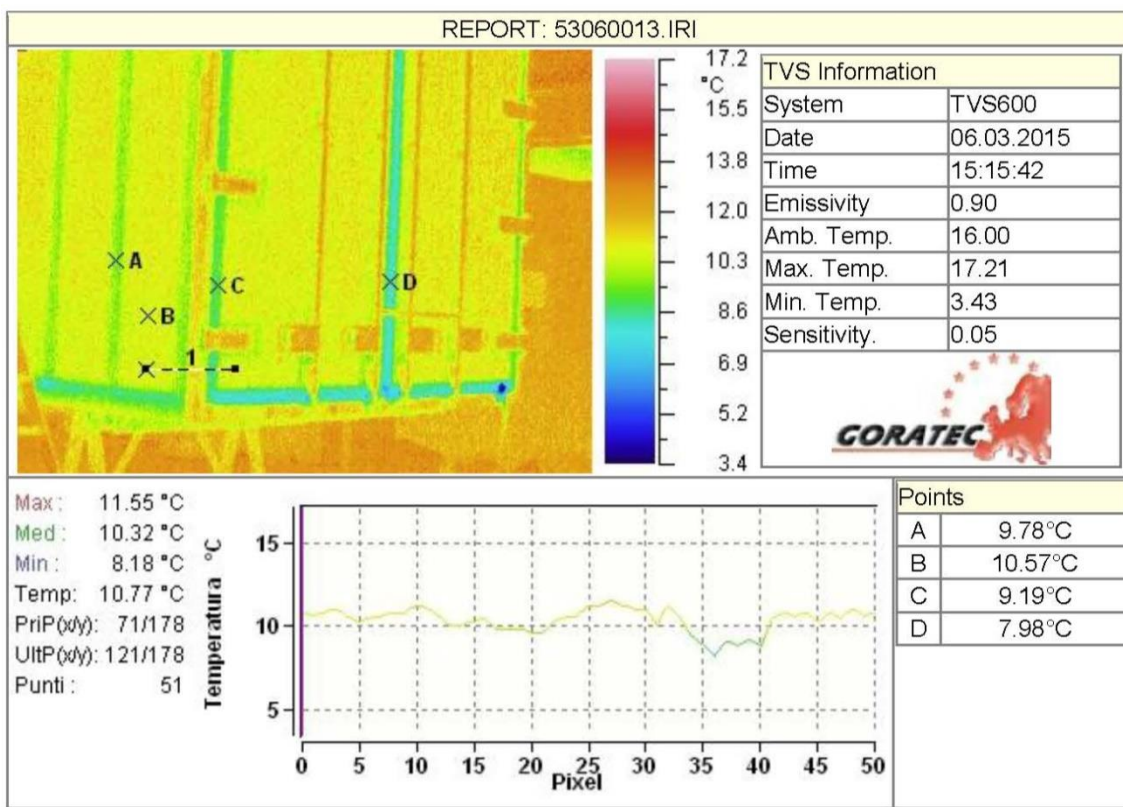


Figura 24: Termografia lato posteriore (porte) ripresa da sinistra fase apertura porte

Si evidenziano i diversi materiali di cui è composto il portale posteriore: guarnizione in gomma (C-D), pannelli in vetroresina (B) e travi rivestite in fibre di vetro (A). Delta termico di 1 °C come si riscontra dalle temperature rilevate nei punti C-D e dal profilo termico (1) lungo lo spigolo, che rappresenta una zona critica. Le oscillazioni termiche sono confacenti alla diversità dei materiali presenti, per cui non vi sono discontinuità materiche e geometriche, ossia non vi sono ponti termici.

Pertanto in quest'ultima fase vengono confermate le analisi condotte in precedenza anche per gli altri lati della cassa mobile. Nel proseguo della trattazione viene analizzata in particolare la situazione interna della cassa dal punto di vista termografico all'apertura delle porte.



Figura 25: Foto digitale interno cassa mobile e piastre eutettiche fase apertura porte

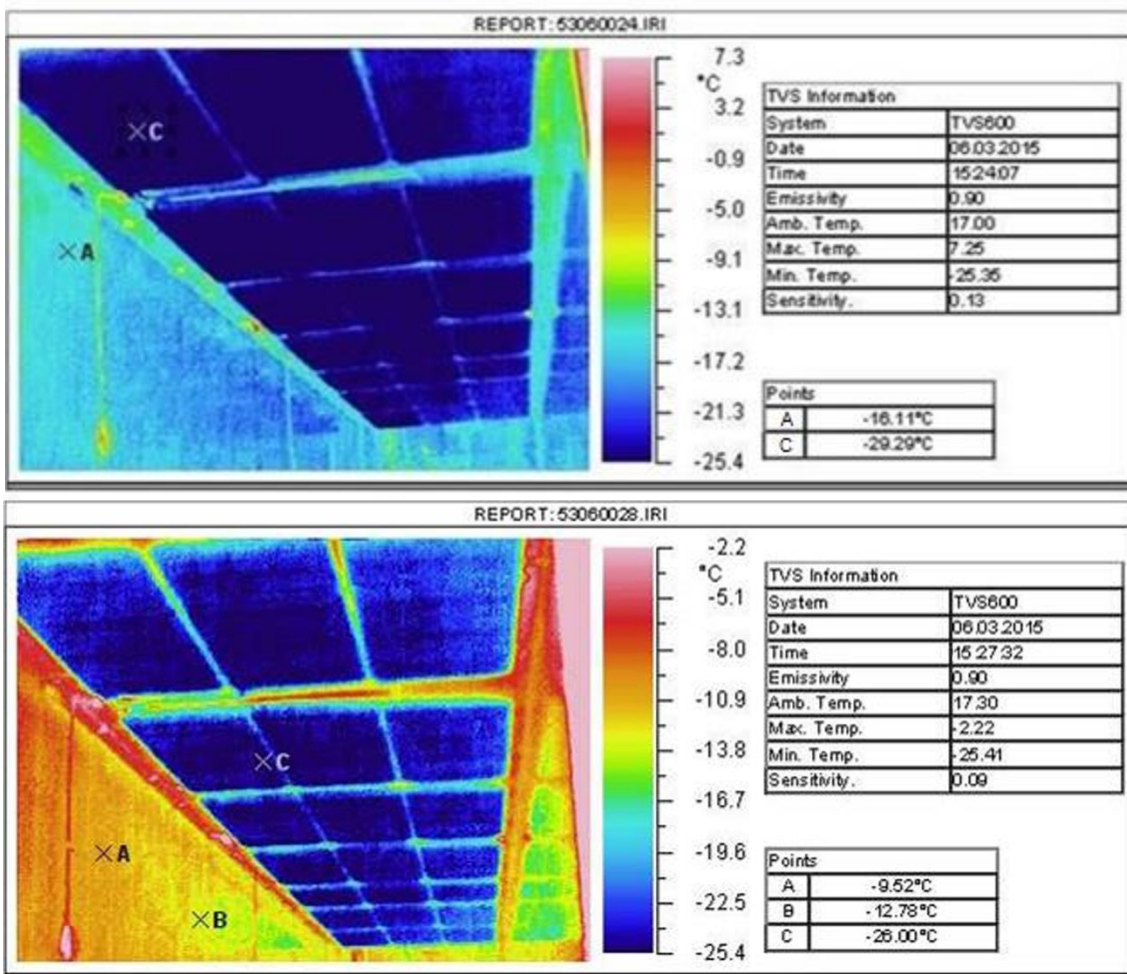


Figura 26: Termografia interno cassa particolare piastre eutettiche fase apertura porte

E' evidente l'aumento della temperatura delle piastre eutettiche (C) dopo l'apertura delle porte dalla temperatura di -29°C a quella di -26 °C nel breve arco temporale di 3 minuti.

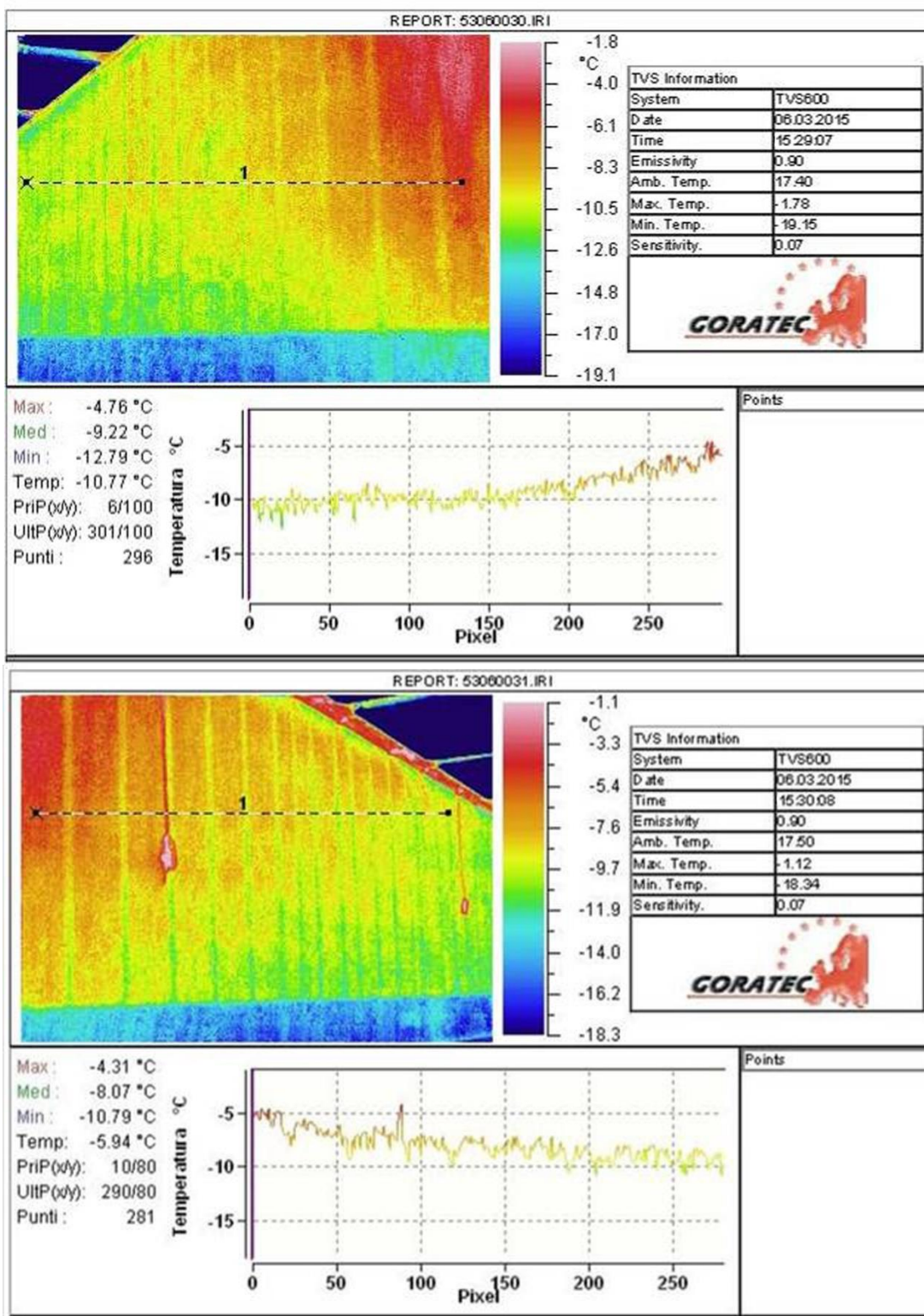


Figura 27: Termografia interno cassa particolare pareti fase apertura porte

Si evidenzia il forte transitorio termico (1) in atto sulle pareti interne (A-B Figura 26), a causa dell'apertura delle porte e quindi dell'immissione all'interno della cassa di flussi di calore provenienti dall'esterno. La struttura interna con le travi di rinforzo è ben visibile anche in questo caso, seppur con temperature estremamente variabili.

5. CONCLUSIONI

L'obiettivo dell'analisi termografica effettuata durante le prove statiche sulla cassa mobile, nell'ambito del Progetto PON PT²-LOG, era quello di rilevare la presenza di eventuali ponti termici sulle pareti della cassa, in corrispondenza di collegamenti od altre strutture di supporto.

Le riprese termografiche sono state effettuate, utilizzando una termocamera AVIO Neo Thermo TVS-600 in dotazione al laboratorio DTE-BBC, da più punti di osservazione, in ore e giorni diversi, rappresentativi di differenti step del viaggio intermodale simulato della cassa mobile in modalità di funzionamento passiva, elettrica o ibrida a seconda dei casi.

Successivamente all'acquisizione delle immagini termografiche, è avvenuta la fase di elaborazione delle stesse mediante un software dedicato professionale, della INPROTEC, che ha permesso di analizzare le immagini termiche e di produrre report personalizzati per l'applicazione in oggetto, mediante caratterizzazione di profili termici, indicazione digitale della temperatura in più punti dell'immagine, istogrammi e altro.

L'analisi termografica nel complesso ha evidenziato innanzitutto i diversi materiali di cui sono composti i vari pannelli della cassa mobile: la pelle esterna dei laminati in vetroresina, le travi interne rivestite in fibre di vetro, le guarnizioni in gomma, i profili perimetrali in alluminio anodizzato, le chiusure posteriori e le cerniere inox. Purtroppo i lucernari sul soffitto e la superficie dei pannelli stessi hanno causato la presenza di molteplici riflessioni termiche in fase di rilievo termografico. Nonostante questo è stato possibile rilevare durante le prove statiche sulla cassa mobile, la non presenza di ponti termici, in quanto i delta termici rilevati in corrispondenza degli spigoli, sono dell'ordine di 1-4 °C e quindi nella norma, e le relative oscillazioni termiche sulle pareti della cassa, sono causate principalmente dalla diversità dei materiali presenti. Una considerazione infine va fatta per il rilievo termografico interno alla cassa mobile nella fase di apertura porte a fine viaggio simulato: nel rilevare la distribuzione termica all'interno della cassa mobile, si evidenzia l'uniformità della temperatura delle piastre eutettiche e la differenza di temperatura tra le stesse e le pareti della cassa mobile.

Tra i sistemi diagnostici non distruttivi, la termografia all'Infrarosso pertanto si conferma una tra le tecniche tecnologicamente più avanzate ed efficaci, in quanto può consentire di individuare eventuali difetti strutturali e in fase di costruzione e durante tutto il ciclo di vita.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Roche G. “La termografia per l’edilizia e l’industria, manuale operativo per le verifiche termografiche”. Maggioli Editore, Rimini, 2012.
- [2] Lanzoni D. “Diagnosi e certificazione energetica: prove strumentali sugli edifici. Termografia - Blower door - Termoflussimetro” Maggioli Editore, Rimini, 2012.
- [3] Neo Thermo TVS-600 Series - Thermal Video System, Operation Manual, Nippon Avionics Co., Ltd
- [4] Cestec S.p.A. (Centro per lo sviluppo tecnologico, l’energia e la competitività), ANCE Lombardia (Associazione regionale dei costruttori edili lombardi), Politecnico di Milano, “Abaco dei ponti termici”, 2011
- [5] PE-Professional Software for infrared image analysis, User Guide, Inprotec S.p.A.
- [6] V. Dattoma, F. Palano, F.W. Panella, “Confronto numerico-sperimentale per il controllo termografico di laminati GFRP”, 2013
- [7] UNI 14683:2008. Ponti termici in edilizia.
- [8] UNI EN 13187:2000. Prestazione termica degli edifici - Rivelazione qualitativa delle irregolarità termiche negli involucri edilizi - Metodo all’infrarosso.

ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
www.enea.it

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati
ottobre 2017