



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in ingegneria meccanica

**CARATTERIZZAZIONE DEI RIFIUTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE MEDIANTE
ANALISI TERMOGRAFICA**

**CHARACTERIZATION OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTES VIA
THERMOGRAPHIC ANALYSIS**

Relatore: Chiar.mo/a

Prof. **Gian Marco Revel**

Tesi di Laurea di:

Francesca Maria Zucchi

Correlatore:

Ing. **Giuseppe Pandarese**

A.A. 2023 / 2024

SOMMARIO

PREMESSA.....	3
INTRODUZIONE.....	4
1. MATERIALI E METODI	8
1.1 CLASSIFICAZIONE E CODIFICA DEI CAMPIONI DI MATERIALE	8
1.2 PREPARAZIONE DEI CAMPIONI DI MATERIALE.....	15
1.3 L'ATTREZZATURA UTILIZZATA.....	17
1.4 LA PROCEDURA DI ACQUISIZIONE	19
2. RISULTATI.....	29
CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	48
3. BIBLIOGRAFIA	50

PREMESSA

I rifiuti da costruzione e demolizione o CDW (Construction and Demolition Waste) costituiscono più di un terzo dei rifiuti prodotti nel territorio UE (Unione Europea). I CDW includono al loro interno una vasta gamma di materiali come calcestruzzo, mattoni, ceramica e piastrelle, materie plastiche, metalli, e legno. Alcuni costituenti dei rifiuti da costruzione e demolizione rappresentano una risorsa di grande valore, mentre altri sono di minor interesse ma possono essere recuperati e riutilizzati per la produzione di nuovi beni.

È evidente l'importanza di riuscire a differenziare le varie categorie di materiali presenti nei CDW, proprio di questo si occupa il progetto europeo RECONSTRUCT (A Territorial Construction System for a Circular Low-Carbon Built Environment; Horizon Europe, GA n. 101082265). RECONSTRUCT è un progetto europeo nel quale collaborano diversi enti, come l'Università Politecnica delle Marche [www.univpm.it], le aziende COMSA [<https://www.comsa.com>] e SORIGUE [www.sorigue.com]. Uno degli obiettivi di questo progetto è quello di valutare la possibilità di caratterizzare ogni categoria di materiali, che costituiscono i rifiuti da costruzione e demolizione, attraverso diverse tecniche di analisi basate su diverse tipologie di sensori e tecniche di processamento dei dati.

In questa tesi si valuta la possibilità di caratterizzare i CDW attraverso l'analisi termografica; qui di seguito si riporta un breve riassunto del progetto sviluppato. Lo scopo delle prove sperimentali eseguite è stato quello di verificare se l'emissività fosse un parametro sufficiente per la completa caratterizzazione delle singole categorie di materiali. Per completa caratterizzazione, si intende la possibilità di distinguere in maniera univoca un materiale dall'altro, basandosi sul diverso comportamento di ciascun materiale dovuto alle differenze di emissività tra una categoria e l'altra. Per fare ciò, sono state eseguite tre prove ripetute di termografia attiva, per ogni campione di materiale. I campioni sono stati posizionati all'interno di una camera di riscaldamento, e sono stati portati a una temperatura opportuna, per poi interrompere il riscaldamento. La termocamera ha acquisito in sequenza una serie di termogrammi, dagli istanti finali di riscaldamento, fino alle ultime fasi del raffreddamento. Per la stima dell'emissività sono stati considerati i termogrammi scattati nella fase di raffreddamento, quando le differenze di comportamento dei diversi materiali dovrebbero essere più evidenti. Su ogni campione è stata applicata della vernice o del nastro ad emissività nota, per avere un riferimento attendibile di temperatura per il calcolo della stessa; inoltre si è assunto, per semplicità, che la temperatura del campione sia la stessa in tutti i suoi punti. Osservando i termogrammi così ottenuti è possibile notare una differenza di temperatura tra la zona su cui è stato applicato il riferimento e il resto del campione; utilizzando quindi i dati termici ottenuti si calcola l'emissività per ogni categoria di materiale. Dall'analisi dei risultati è emerso che per molti materiali i valori di emissività sono simili o quasi coincidenti, il che rende difficile, se non impossibile, distinguere una categoria di materiale dall'altra considerando solo l'emissività. Ad ogni modo, si sottolinea l'importanza di questo parametro che è peculiare del materiale considerato.

INTRODUZIONE

In questo capitolo si vuole illustrare in maniera dettagliata il problema della gestione e del recupero dei rifiuti da costruzione e demolizione, in ambito europeo, riportando alcuni dati dal rapporto UE del 2011 e la normativa di riferimento [1]. Si citeranno alcuni studi che hanno fornito diverse soluzioni per il riutilizzo dei CDW, sotto forma di aggregati riciclati, in applicazioni di alta importanza ingegneristica. Come si vedrà a breve, per le applicazioni di alta qualità, gli aggregati riciclati da CDW devono presentare determinati livelli di purezza, a tal fine devono essere sviluppati dei sistemi dedicati, in grado di separare in maniera più efficace i vari costituenti, rispetto agli impianti già esistenti. Da diversi anni si sta cercando di sviluppare dei sistemi innovativi semiautomatici per la selezione dei rifiuti, basati su sensori di diverse tipologie. I risultati delle varie ricerche sono incoraggianti, ed evidenziano la possibilità futura di poter realizzare sistemi automatici per lo smistamento dei rifiuti, che sfruttano una o più varietà di trasduttori. Verranno citati alcuni studi condotti in precedenza con diverse tipologie di strumenti di misura ed elementi sensibili, tra cui le termocamere. Dato che in questo studio si valuterà la possibilità di differenziare le varie tipologie di materiali presenti nei CDW tramite analisi termografica, si farà un breve preambolo alla termografia, per fornire tutte le conoscenze alla base del progetto sviluppato.

La progressiva urbanizzazione dei paesi europei ha provocato negli anni una crescita della produzione di rifiuti da costruzione e da demolizione, a tal punto da renderli uno dei maggiori flussi di rifiuti. Basti pensare che nel 2002 sono state prodotte 510 milioni di tonnellate di CDW [1], e già nel 2006 i rifiuti da costruzione e demolizione prodotti ammontavano a 970 milioni di tonnellate [1]. Il crescente aumento della quantità di CDW prodotta ogni anno nei paesi UE ha spinto le autorità legislative europee a emanare la direttiva 2008/98/CE, per l'identificazione dei rifiuti da costruzione e demolizione, e la loro gestione. La normativa pone come obiettivo il riciclaggio, di almeno il 70% in peso entro il 2020, dei rifiuti da costruzione e demolizione non pericolosi [1]. Attualmente la maggioranza dei prodotti ottenuti da CDW sono aggregati riciclati derivati da calcestruzzo, mattoni e piastrelle; tali prodotti presentano scarse caratteristiche, per cui vengono impiegati in applicazioni di bassa importanza ingegneristica, come la costruzione di terrapieni e fondi per le strade. Data la grande disponibilità degli aggregati riciclati, il mercato di questi ultimi si sta progressivamente saturando, perciò, è necessario individuare altre soluzioni di maggiore importanza strutturale che prevedano il loro utilizzo [2]. Da precedenti esperienze, risulta evidente la possibilità di impiego degli aggregati riciclati per la produzione di calcestruzzo con una maggiore importanza strutturale rispetto alle applicazioni di basso livello [3], ma questi devono contenere quantità minime di impurezze e contaminanti [2]. In particolare, va minimizzata la presenza di gesso e sostanze organiche come legno, plastica, e schiume organiche, dato che questi influenzano le proprietà e la qualità degli aggregati riciclati [4]. Il gesso invece contiene dei solfati reattivi solubili in acqua che possono produrre reazioni espansive [3].

Risulta evidente l'importanza di differenziare in maniera efficace ed efficiente le varie tipologie di materiali presenti nei CDW. Attualmente i sistemi di riciclaggio esistenti prevedono macchinari per la frantumazione, nastri trasportatori, cabine di selezione manuale per la rimozione di elementi come gesso, legno, e plastica, e altri impianti di separazione che sfruttano la differenza di densità tra vari materiali, o soluzioni che sfruttano le proprietà magnetiche dei vari componenti dei CDW [4]. Se si utilizzano aggregati riciclati provenienti da CDW estremamente eterogenei, le tecniche esistenti non sono in grado di fornire i livelli di purezza richiesti per le applicazioni di alta qualità,

perciò, occorre trovare altri metodi in grado di soddisfare le specifiche tecniche. La diffusione sempre crescente di nuove tecnologie come trasduttori, robot, computer vision, e intelligenza artificiale, nei vari ambiti dei processi produttivi, ha spinto i ricercatori a valutare la possibilità di impiegare sensori nei processi di differenziazione dei rifiuti. Automatizzare il processo di selezione comporterebbe tutta una serie di vantaggi, tra cui la riduzione dei rischi a cui sono esposti gli operatori, dato che nei CDW sono presenti materiali pericolosi come l'amianto. In letteratura sono già presenti moltissimi studi in cui vengono impiegati una vasta varietà di sensori e soluzioni differenti. Sono stati utilizzati ad esempio sensori nel vicino infrarosso NIR (Near InfraRed) per valutare e migliorare la qualità della composizione degli aggregati riciclati misti [4]. Altre ricerche hanno fatto uso di telecamere iperspettrali per il riconoscimento dei vari materiali presenti nei CDW [5], [6]. Data la diffusione delle telecamere industriali, si è valutata la possibilità di sviluppare software basati sull'intelligenza artificiale, che realizzano la selezione dei vari materiali sulla base di semplici immagini [7], [8], [9]. Risulta interessante valutare se l'uso di più sensori di diverse tipologie può portare a risultati migliori rispetto a metodi che usano solamente una tipologia di sensore, per cui in diversi studi si propone l'uso combinato di diversi elementi sensibili come: sensori NIR, telecamere iperspettrali, telecamere industriali, termocamere, [10], [11], [12], [13]. Considerando il vasto campo di applicazione delle termocamere a livello industriale, e date le differenze di emissività tra diverse categorie di materiale, alcuni studi hanno deciso di basare la classificazione di diverse tipologie di materiali usando la termografia [14], [15], [16], [17]. I risultati ottenuti nei vari studi sono piuttosto interessanti. Nella ricerca [4] si è dimostrato che la selezione tramite sensore NIR permette di ridurre la percentuale di componenti indesiderati negli aggregati riciclati ad una percentuale inferiore dell'1%, nella maggior parte delle prove eseguite, rispettando così le specifiche tecniche. Nello studio [13] è stata eseguita una prima selezione basandosi solo su semplici immagini, scattate da telecamere industriali. Tale selezione è stata poi migliorata basandosi su dati termici provenienti da termocamere. L'uso accoppiato di termocamere e telecamere industriali permette di migliorare del 10% il tasso di riconoscimento dei rifiuti, rispetto alla selezione basata sull'uso di sole telecamere [13]. L'esperienza [9] mostra la possibilità di elaborare un software basato sulla computer vision in grado di fornire un output in 0,51 s, con accuratezza simile a studi già eseguiti in precedenza. Nello studio [7], il sistema elaborato ha eseguito con successo più del 98% degli esperimenti di selezione e prelievo, va però detto che la percentuale di riuscita dipende molto dalle condizioni ambientali e di illuminazione, infatti i risultati migliori sono stati ottenuti in laboratorio. Nella ricerca [8] il modello di riconoscimento elaborato ha un'accuratezza del $94,71 \pm 1,69\%$. Nello studio [10] i risultati migliori sono stati ottenuti dalla rete neurale, che ha una precisione del 79,20%. Infine le ricerche basate sull'iperspettrale [5] mostrano notevoli risultati. Prima di fornire direttamente i risultati dello studio, si definisce la sensibilità del modello come l'attitudine del modello ad evitare falsi negativi, e la specificità come l'attitudine del modello ad evitare falsi positivi. I valori ottenuti in [5] di sensibilità e specificità variano rispettivamente, da 0,94 a 1,00 e da 0,89 a 1,00. Risultati altrettanto incoraggianti sono stati riscontrati nelle esperienze con la termografia attiva, per esempio in [15] l'accuratezza del sistema sviluppato varia da un minimo dell'85% a un massimo del 96%. Similmente nello studio [14] l'accuratezza del sistema basato sulle immagini termiche varia dall'84% al 96%. Basandosi sullo stato dell'arte sulla caratterizzazione e selezione dei CDW, si può concludere che è possibile elaborare dei sistemi ad alta accuratezza in grado di rispettare le specifiche tecniche per gli aggregati riciclati di alta qualità.

Ispirandosi agli studi già eseguiti con la termografia attiva, si è deciso di determinare sperimentalmente l'emissività dei principali materiali presenti nei CDW, utilizzando un set-up di prova relativamente semplice. I valori di emissività ottenuti per le varie classi di materiali sono stati confrontati tra loro, per valutare la possibilità di distinguere univocamente un componente dall'altro. I risultati ottenuti sono stati paragonati ai valori presenti in letteratura, considerando la banda spettrale utilizzata, in modo da verificarne la validità. Prima di passare alla spiegazione delle metodologie di prova e dei risultati, si vuole riportare una breve introduzione alla termografia, per fornire tutte le conoscenze utili per comprendere le scelte operative eseguite e i risultati ottenuti. L'analisi termografica è un metodo che tramite l'utilizzo di una termocamera, restituisce un'immagine a falsi colori o in scala di grigi, che rappresenta la distribuzione di temperatura su un corpo. Tale tecnica ha un vasto campo di utilizzo, dalla manutenzione, ai controlli non distruttivi, alle applicazioni di laboratorio, fino agli usi nel settore medico [18]. La misura della temperatura si basa sulla rilevazione dell'energia radiante emessa dal corpo inquadrato dalla termocamera nel campo infrarosso. L'infrarosso è una banda dello spettro elettromagnetico, e comprende le onde aventi lunghezza da 0,78 μm a 1 mm. L'esistenza di questa banda fu scoperta da Frederik William Herschel nel 1828. Conducendo esperimenti con un prisma ed un termometro, si accorse che muovendo il bulbo del termometro dal violetto al rosso la temperatura aumentava. Infine osservò che muovendo il bulbo oltre il rosso, l'effetto termico cresceva ulteriormente, fu scoperta così l'esistenza del calore oltre rosso, ormai conosciuto come infrarosso. I raggi infrarossi sono dunque responsabili della trasmissione di energia termica tramite irraggiamento. La banda dell'infrarosso, come già detto in precedenza, si estende dai 0,78 μm a 1 mm, ma può essere suddivisa in ulteriori bande.

- Infrarosso vicino da 0,78 μm a 2 μm , viene utilizzato prevalentemente in particolari applicazioni di laboratorio, come l'analisi di dipinti tramite riflettografia ad infrarosso [18].
- Infrarosso medio da 2 μm a 6 μm (prima finestra atmosferica), nella termografia si usa il campo spettrale che va da 3 a 5,6 μm , dato che i sensori operanti in questo campo possono essere raffreddati tramite elementi di Peltier, e quindi permettono di realizzare termocamere di dimensioni contenute e funzionanti a batteria. Gli svantaggi principali sono la sensibilità alle riflessioni solari, e la possibilità di utilizzo solo per distanze inferiori ai 100 m di distanza [18].
- Infrarosso lontano da 6 μm a 15 μm (seconda finestra atmosferica), il campo più favorevole per l'uso delle termocamere ad infrarossi si estende dagli 8 ai 12 μm , dato che in questa banda si ha un'ottima trasparenza dell'atmosfera a 100 m di distanza, inoltre si ha minore influenza delle riflessioni solari, e soprattutto i sensori disponibili sono del tipo FPA (Focal Plane Array) microbolometrici e non necessitano di sistemi di raffreddamento [18].
- Infrarosso estremo da 15 μm a 1000 μm , non ha applicazioni scientifiche tranne che in astronomia [18].

La tipologia di termocamere più diffuse sono quelle del tipo FPA, ovvero l'elemento sensibile è costituito da una disposizione bidimensionale di migliaia di sensori. Ad ogni elemento sensibile corrisponderà un pixel dell'immagine termica. Tali dispositivi permettono di ottenere immagini ad elevata risoluzione termica, geometrica e non necessitano di circuiti di raffreddamento. Questi sensori producono un segnale elettrico che dipende dalla radiazione emessa dal corpo di cui si vuole determinare la temperatura [18]. Si procede illustrando brevemente la fisica dell'irraggiamento, fondamentale per comprendere le formule utilizzate per il calcolo dell'emissività sui vari campioni

di materiale. Per un corpo nero, ovvero un corpo in grado di emettere tutta la radiazione assorbita, la radianza (energia emessa nell'unità di superficie e nell'unità di tempo) vale (Equazione 1):

$$W_{CN} = \sigma T^4$$

Equazione 1

Il corpo nero però è solo un'astrazione fisica, i corpi reali emettono una radianza che è proporzionale all'emissività (Equazione 2):

$$W = \sigma \varepsilon T^4$$

Equazione 2

Osservando la formula si può intuire che corpi ad emissività diversa, ma che si trovano alla stessa temperatura, hanno una radianza diversa. L'emissività è quindi un fattore importantissimo di cui tenere conto, poiché è la principale fonte di incertezza nelle misure di temperatura basate sull'irraggiamento. Sulle termocamere solitamente è possibile impostare il valore di emissività e quindi è possibile conoscere con precisione la temperatura di un corpo, se questo è costituito da un unico materiale, e se il valore di emissività per quello specifico materiale è noto. Data l'importanza di conoscere i valori di emissività per le varie tipologie di materiali esistenti, sono state elaborate delle tecniche di prova per la sua determinazione sperimentale. L'emissività può essere determinata in due modi, o col metodo a contatto che sfrutta l'uso di termocoppie di precisione, o col metodo per comparazione [18]. In questo progetto si è deciso di utilizzare il metodo per comparazione data la sua semplicità di applicazione. La procedura per la determinazione dell'emissività per comparazione è regolamentata dalla norma ISO 18434-1 [19]. Il procedimento da normativa prevede l'applicazione sulla superficie del corpo oggetto di studio di un materiale ad emissività nota, come vernice o nastro, aventi di solito un valore di ε elevato, che fungono da riferimento per la misura della temperatura reale. Riscaldando il corpo, in modo che la superficie su cui è applicato il riferimento e la restante parte del materiale si trovino alla stessa temperatura, si nota che la termocamera rileva due zone a temperature diverse, e ciò è dovuto alla differenza di emissività tra la vernice o nastro e il materiale. Il riscaldamento deve essere tale da portare il provino a 20 °C al di sopra della temperatura ambiente [19]. È possibile determinare direttamente l'emissività del campione dalla termocamera, modificando il parametro dell'emissività fino a che la temperatura sulla superficie non verniciata raggiunge lo stesso valore dell'area su cui è applicata la vernice. In questo modo è possibile determinare l'emissività in maniera semplice e precisa. Nonostante la norma preveda un riscaldamento di almeno 20 °C sopra la temperatura ambiente, nelle prove che sono state eseguite si è deciso di applicare un riscaldamento molto più basso, per evitare di compromettere l'integrità dei campioni in plastica, e in carta o cartone. Quando si utilizza la termografia come metodo di misura della temperatura, occorre tener conto anche della riflessione, che costituisce un'ulteriore incertezza. La riflessione interessa particolarmente i materiali con superficie a bassa emissività. Esistono diverse soluzioni per compensare la riflessione, una di queste è schermare con pannelli isolanti (in polistirolo, legno, ecc.) le fonti di riflessione e dipingere di nero il percorso tra termocamera e oggetto. Ora che sono state fornite tutte le basi teoriche necessarie per comprendere ciò che è stato fatto in questo studio, si procede illustrando la metodologia di prova e i dati ottenuti [18].

1. MATERIALI E METODI

Di seguito è riportata in maniera dettagliata l'intera procedura adottata per la classificazione e codifica dei provini e la preparazione che essi devono subire prima di poter essere sottoposti alle prove di termografia attiva; viene inoltre descritta l'attrezzatura utilizzata, infine si descrive nello specifico la modalità di acquisizione e le tecniche utilizzate per l'elaborazione dei dati e per il calcolo dell'emissività per ciascun campione di ciascun materiale.

1.1 CLASSIFICAZIONE E CODIFICA DEI CAMPIONI DI MATERIALE

Come operazioni preliminari sono state eseguite la classificazione e la codifica dei campioni di materiale, per distinguerli in maniera rapida e univoca. Nella fase di classificazione i provini sono stati suddivisi in base all'azienda partner che li ha forniti, individuando così due gruppi principali:

- provini provenienti dall'azienda COMSA;
- provini provenienti dall'azienda SORIGUE.

Prima di procedere, si presenta una breve distinzione dei siti delle due aziende. COMSA è un sito di costruzione, mentre SORIGUE è un sito di gestione dei rifiuti.

I campioni appartenenti ai due gruppi hanno subito un'ulteriore classificazione interna, per i provini appartenenti alla COMSA si è deciso di uniformarsi alla classificazione e catalogazione fornita dall'azienda. Per i campioni della SORIGUE si ha implementato una propria categorizzazione e codifica dei provini, a partire da una suddivisione primaria proposta dall'azienda fornitrice. Il codice ottenuto è un codice parlante a struttura gerarchica che fornisce le principali informazioni riguardo al materiale (Figura 1, Figura 2).

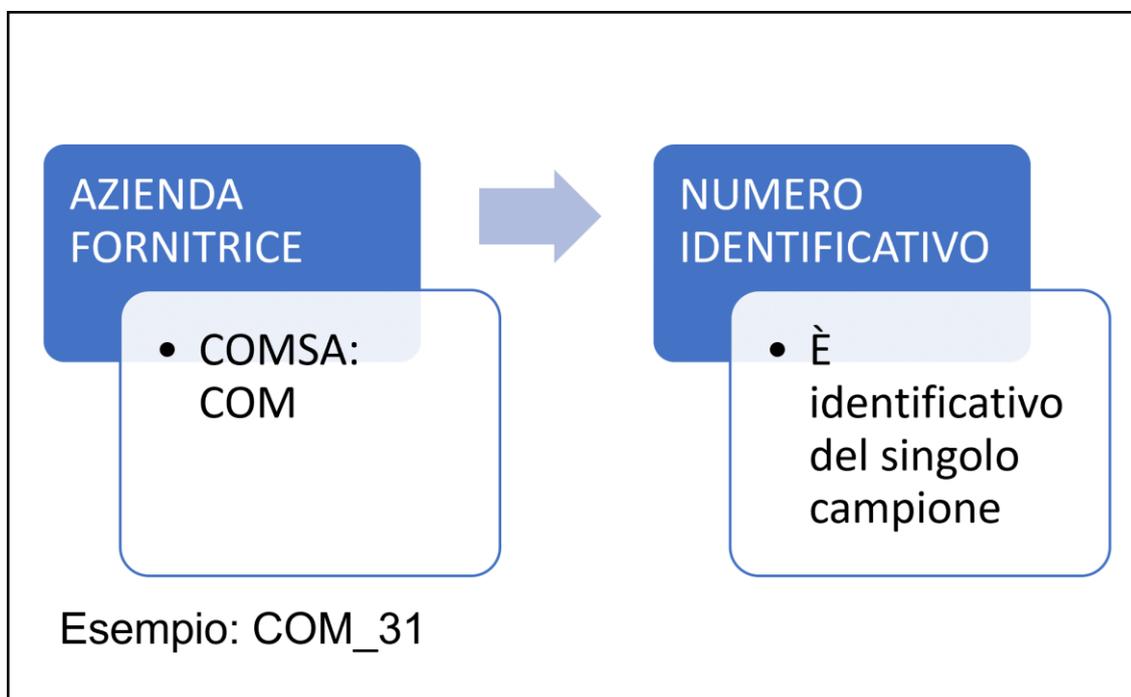


Figura 1 Schematizzazione del codice identificativo dei campioni COMSA.

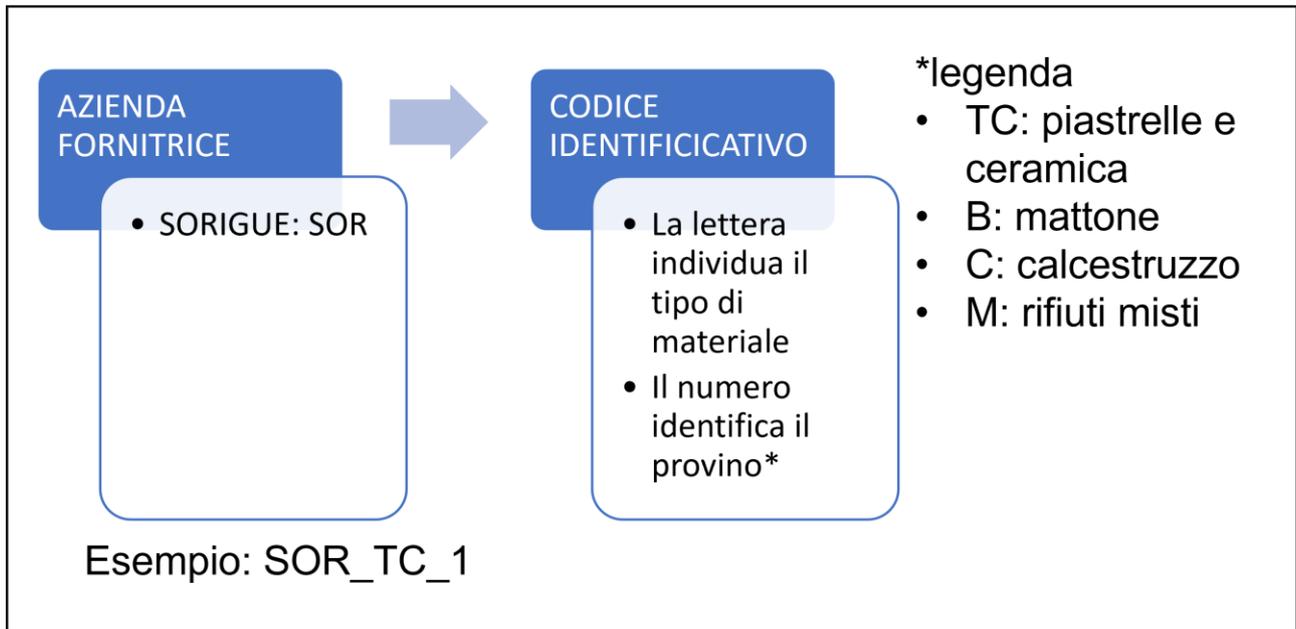


Figura 2 Schematizzazione del codice identificativo dei campioni SORIGUE.

Nella fase di classificazione e catalogazione ogni campione è stato ispezionato visivamente per valutare le eventuali difficoltà di analisi dello stesso, e i possibili accorgimenti da dover prendere per la corretta esecuzione delle prove. Alcuni provini non sono stati analizzati, dato che la loro forma e dimensioni erano tali da rendere del tutto inutile un eventuale tentativo di analisi termografica sugli stessi. Altri provini hanno subito una procedura di analisi leggermente differente dagli altri, data la disuniformità delle caratteristiche sulla superficie del provino. Ad esempio, per i campioni appartenenti alla categoria piastrelle sono state previste acquisizioni su entrambe le facce degli stessi (la stessa procedura va applicata per un qualsiasi provino avente almeno due facce dissimili tra loro). Di seguito si riporta il catalogo così ottenuto: per ogni provino è specificata l'azienda fornitrice, il materiale, il numero di lati su cui eseguire le prove, il riferimento da applicare sulla superficie dello stesso, ed eventuali operazioni preliminari atte a facilitare le analisi. A seguire viene riportata l'intera lista di provini analizzati in Tabella 1:

Immagine del campione	Azienda fornitrice	Materiale	Codice identificativo	Lati analizzati	Riferimento utilizzato e trattamenti aggiuntivi
	COMSA	plastica	COM_1	1	Nastro ad emissività nota

	COMSA	plastica	COM_2	1	Vernice ad emissività nota
	COMSA	plastica	COM_3	1	Nastro ad emissività nota
	COMSA	plastica	COM_4	1	Vernice ad emissività nota
	COMSA	plastica	COM_5	1	Vernice ad emissività nota
	COMSA	plastica	COM_6	1	Nastro ad emissività nota
	COMSA	plastica	COM_7	1	Vernice ad emissività nota
	COMSA	plastica	COM_9	1	Vernice ad emissività nota
	COMSA	plastica	COM_10	1	Nastro ad emissività nota
	COMSA	plastica	COM_11	1	Vernice ad emissività nota

	COMSA	plastica	COM_12	1	Vernice ad emissività nota
	COMSA	plastica	COM_13	2	Nastro ad emissività nota Taglio e sagomatura
	COMSA	plastica	COM_14	2	Nastro ad emissività nota
	COMSA	plastica	COM_15	2	Nastro ad emissività nota Taglio e sagomatura
	COMSA	metallo	COM_16	1	Nastro ad emissività nota Taglio e sagomatura
	COMSA	metallo	COM_18	2	Nastro ad emissività nota
	COMSA	metallo	COM_19	1	Vernice ad emissività nota
	COMSA	metallo	COM_20	1	Nastro ad emissività nota
	COMSA	legno	COM_21	1	Nastro ad emissività nota

	COMSA	carta e cartone	COM_22	2	Vernice ad emissività nota
	COMSA	legno	COM_23	1	Vernice ad emissività nota
	COMSA	legno	COM_24	1	Nastro ad emissività nota
	COMSA	carta e cartone	COM_25	1	Vernice ad emissività nota
	COMSA	carta e cartone	COM_26	1	Vernice ad emissività nota Taglio e sagomatura
	COMSA	carta e cartone	COM_27	1	Vernice ad emissività nota Taglio e sagomatura
	COMSA	ceramica	COM_28	1	Nastro ad emissività nota
	COMSA	calcestruzzo	COM_29	1	Nastro ad emissività nota
	COMSA	plastica	COM_30	1	Vernice ad emissività nota

	COMSA	mattoni	COM_31	2	Nastro ad emissività nota
	SORIGUE	calcestruzzo	SOR_C1	1	Vernice ad emissività nota
	SORIGUE	calcestruzzo	SOR_C2	1	Vernice ad emissività nota
	SORIGUE	calcestruzzo	SOR_C3	1	Vernice ad emissività nota
	SORIGUE	calcestruzzo	SOR_C4	1	Vernice ad emissività nota
	SORIGUE	calcestruzzo	SOR_C5	1	Vernice ad emissività nota
	SORIGUE	mattoni	SOR_B1	2	Vernice ad emissività nota
	SORIGUE	mattoni	SOR_B2	2	Vernice ad emissività nota
	SORIGUE	mattoni	SOR_B3	2	Vernice ad emissività nota

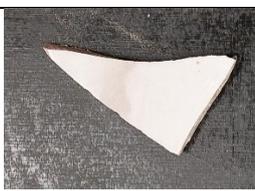
	SORIGUE	mattoni	SOR_B4	2	Vernice ad emissività nota
	SORIGUE	mattoni	SOR_B5	2	Vernice ad emissività nota
	SORIGUE	ceramica e piastrelle	SOR_TC1	2	Nastro ad emissività nota e vernice ad emissività nota
	SORIGUE	ceramica e piastrelle	SOR_TC2	2	Nastro ad emissività nota e vernice ad emissività nota
	SORIGUE	ceramica e piastrelle	SOR_TC3	2	Nastro ad emissività nota e vernice ad emissività nota
	SORIGUE	ceramica e piastrelle	SOR_TC4	2	Nastro ad emissività nota e vernice ad emissività nota
	SORIGUE	ceramica e piastrelle	SOR_TC5	2	Nastro ad emissività nota e vernice ad emissività nota
	SORIGUE	rifiuti misti	SOR_M1	1	Vernice ad emissività nota

Tabella 1 Catalogazione dei campioni COMSA e SORIGUE

Come si può osservare dalla tabella precedente, nella fase di codifica sono state stabilite tutte le operazioni che andranno eseguite sui vari campioni di materiale, prima di procedere con le analisi degli stessi. Di seguito viene riportata nello specifico la spiegazione delle varie fasi di preparazione dei provini.

1.2 PREPARAZIONE DEI CAMPIONI DI MATERIALE

Nella fase di preparazione sui campioni di materiale sono state eseguite una serie di operazioni atte a garantire il corretto svolgimento delle prove. Come prima cosa per ogni provino è stata valutata la necessità di intervenire sulla forma per semplificarne l'analisi. In alcuni casi la geometria del campione rendeva molto difficile il posizionamento stabile dello stesso all'interno della camera di riscaldamento, per questo motivo alcuni campioni sono stati tagliati e opportunamente sagomati, in modo da disporre di un oggetto abbastanza planare per garantirne la stabilità se appoggiato su un piano. Una volta fatto ciò si procede con l'applicazione di un riferimento ad emissività nota sulla superficie del provino. Per far fronte ad esigenze diverse sui vari provini sono stati utilizzati i seguenti riferimenti.

1. Vernice HiE-Coat-840-C [20], si tratta di una vernice ad alta emissività adatta a materiali ceramici, è stata utilizzata su campioni di calcestruzzo, mattoni, su acciaio ossidato, su alcuni campioni di plastica (laddove l'uso del nastro ad emissività nota risultasse sconsigliato), su alcuni campioni di legno e su carta e cartone. Per la corretta applicazione della vernice occorre seguire la seguente procedura, avendo cura di indossare guanti protettivi e una mascherina per proteggere le vie respiratorie:
 - prima dell'applicazione della vernice scuotere bene il contenitore e mescolare attentamente;
 - applicare la vernice sulle superfici del provino sul quale si intende fare l'acquisizione, per assicurare la completa adesione si consiglia di applicarla due o tre volte;
 - lasciare ad asciugare la vernice per un'ora a temperatura ambiente;
 - eseguire l'ultima fase di cura della vernice inserendo il campione in forno preriscaldato a 100 °C e cuocere per un'ora; qualora la natura del materiale non permetta di realizzare la cura in forno, è possibile lasciar asciugare la vernice a temperatura ambiente per 16 o 24 ore.

Di seguito è riportato in Figura 3 un estratto della scheda tecnica della vernice reperibile dal sito del produttore [20]. L'azienda fornisce dati riguardo la vernice da 300 °C in poi, ciò significa che per temperature inferiori ai 300 °C il comportamento della vernice rimane all'incirca costante, e pertanto si assumono tali dati come riferimento per l'emissività della stessa per l'intervallo termico che va dalla fine del riscaldamento alla temperatura ambiente (Figura 3).

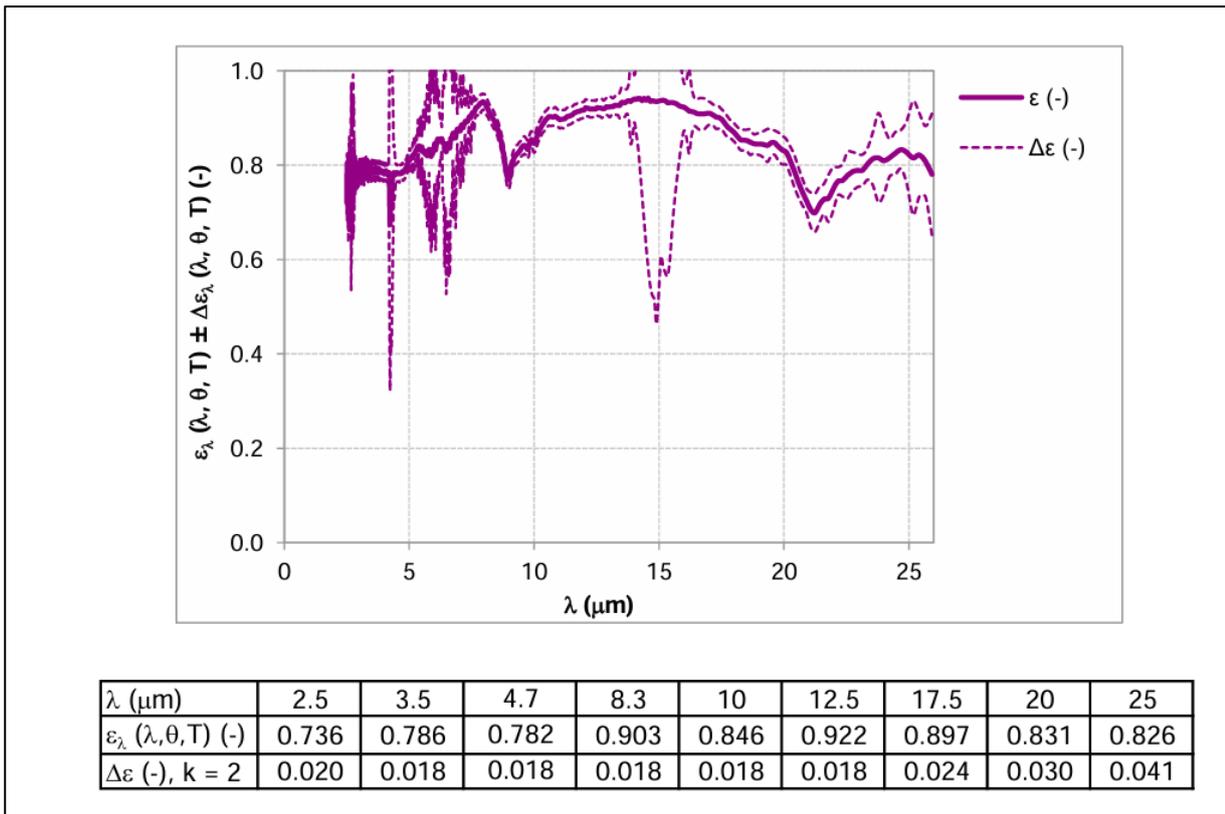


Figura 3 Andamento dell'emissività della vernice in funzione della lunghezza d'onda a $T=300^\circ\text{C}$, [20].

- Nastro ad emissività nota (Figura 4): è un nastro da termografia che viene fornito in dotazione alle termocamere, ha un'emissività pari a 0,93. È stato utilizzato nei campioni sui quali la vernice non riusciva ad aderire, quindi su tutti i provini aventi superficie liscia, come ceramica e sul lato smaltato delle piastrelle, sul metallo, e su alcuni provini di plastica e di legno. Il nastro va applicato avendo cura di farlo aderire perfettamente alla superficie, evitando la formazione di bolle d'aria.



Figura 4 Nastro ad emissività nota [www.g-m-tech.com].

1.3 L'ATTREZZATURA UTILIZZATA

Terminata la preparazione dei provini, è possibile procedere con le prove sperimentali. Prima di proseguire illustrando nel dettaglio la procedura di acquisizione, si presenta di seguito la descrizione dell'attrezzatura utilizzata per realizzare le prove di laboratorio. Per l'acquisizione dei termogrammi è stata utilizzata la termocamera VarioCam 980HD (Infratec, Dresden Germania), a seguire si riportano le caratteristiche principali dello strumento (Tabella 2):

Frequenza di acquisizione	Frame rate: Full-frame: 30 Hz (1,024 × 768), sub-frame formats*: 60 Hz (640 × 480) / 120 Hz (384 × 288) / 240 Hz (1,024 × 96)
Gamma di lunghezza d'onda min	7,50 μm
Gamma di lunghezza d'onda MAX	14 μm
Tipo di sensore IR	Microbolometer Focal Plane Array
Dimensione della matrice (larghezza)	1024 pixel
Dimensione della matrice (altezza)	768 pixel
Temperatura min	-40°C
Temperatura MAX	1200°C
Risoluzione di temperatura a 30°C	0,02 K
Accuratezza di misura	$\pm 1\text{ }^\circ\text{C o } \pm 1\%$

Tabella 2 Scheda tecnica termocamera VarioCam 980 HD

La termocamera è collegata a un computer dotato del software IRBIS 3 plus (Figura 5 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), che permette di visualizzare il campione e monitorare in tempo reale la prova, inoltre realizza il salvataggio dei termogrammi sul dispositivo. In Figura 5 è mostrato un esempio di come appare l'interfaccia del software.

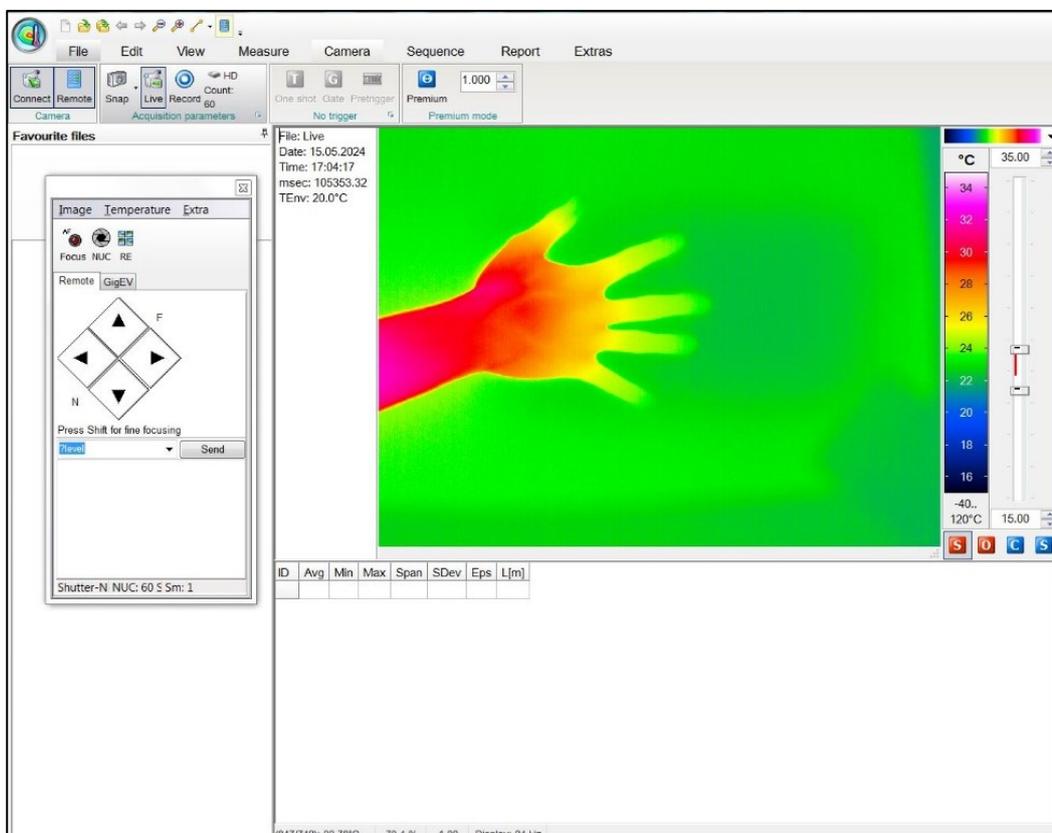


Figura 5 Interfaccia software IRBIS 3 plus.

Il campione di materiale durante la prova viene inserito all'interno una camera di riscaldamento (Figura 7) in alluminio, il cui scopo è anche quello di isolare l'oggetto da fonti di luce e di calore esterne alla camera. All'interno di quest'ultima si trova un piano di appoggio in legno verniciato di nero, che permette di avere uno sfondo uniforme e riduce al minimo la riflessione sulla termocamera, dato che è in grado di assorbire quasi completamente la luce incidente. Sulla parte alta della camera sono installate quattro lampade alogene, da 1 W di potenza ciascuna, di cui la disposizione è rappresentata in Figura 6, che realizzano il riscaldamento del provino. Sul pannello superiore della camera di riscaldamento è realizzata una finestra che permette alla termocamera di inquadrare dall'alto il campione. È stato utilizzato uno schermo opportunamente sagomato per evitare l'effetto della riflessione delle lampade ancora calde sul provino durante l'acquisizione. Lo schermo è stato realizzato a partire da una semplice scatola su cui è stato realizzato un foro grande abbastanza in modo da schermare le lampade e di inquadrare il campione senza coprirlo parzialmente o del tutto.

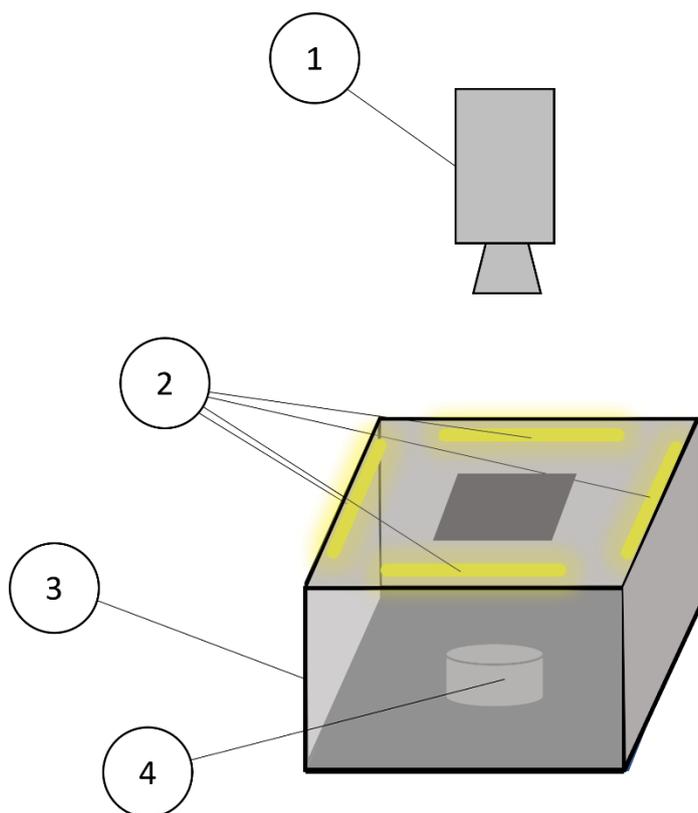


Figura 6 Schematizzazione del set-up di prova. 1) termocamera; 2) lampade alogene; 3) camera di riscaldamento; 4) campione.

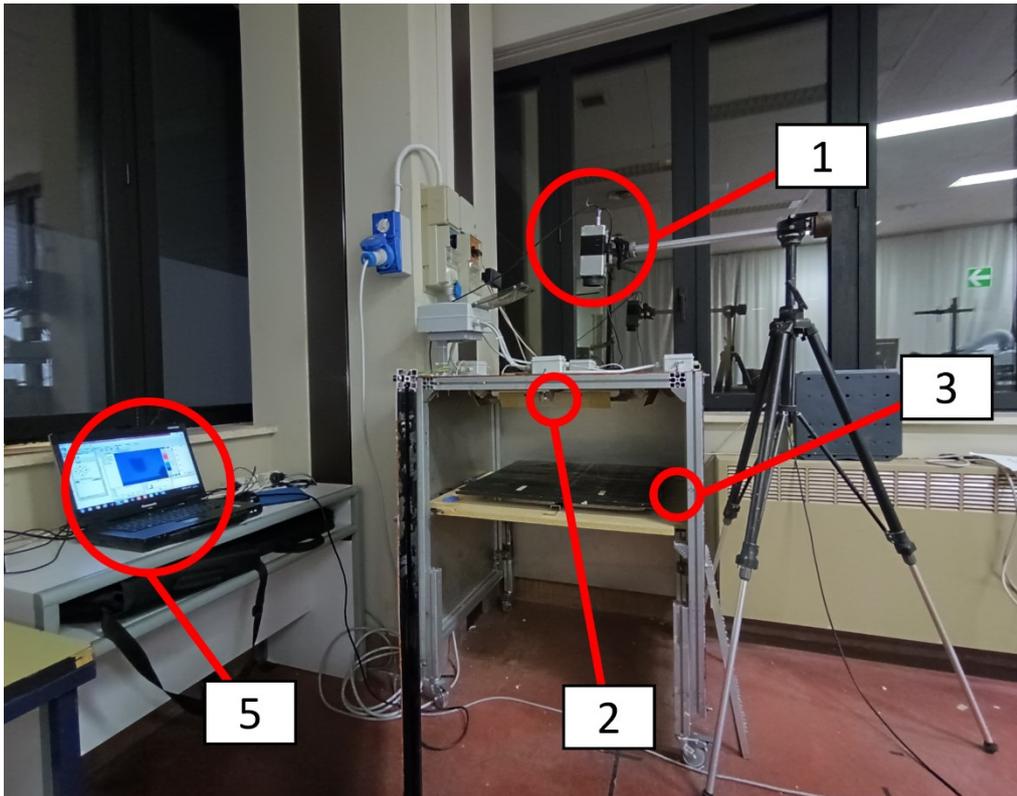


Figura 7 Immagine raffigurante l'attrezzatura. 1) termocamera, 2) lampade alogene; 3) camera di riscaldamento, 5) postazione informatica per il salvataggio dati.

1.4 LA PROCEDURA DI ACQUISIZIONE

Ora che è stata illustrata nel dettaglio l'attrezzatura utilizzata, si procede con la descrizione della procedura operativa effettuata per l'acquisizione dei termogrammi e per l'analisi dei dati ottenuti. La termocamera è montata su un treppiedi che permette di aggiustare l'inquadratura in modo da comprendere l'intero campione nella visuale. Prima di procedere con le prove si verifica la messa a fuoco della termocamera, se l'immagine vista sul software appare sfocata occorre correggerla tramite l'apposita funzione del software. Per eseguire la messa a fuoco si realizza un breve riscaldamento su un oggetto qualsiasi e poi si regola l'immagine fino a raggiungere la nitidezza desiderata; oppure è possibile usare la propria mano, che ha emissività e temperatura diversa dallo sfondo in legno. L'importante è disporre di un oggetto a una temperatura o emissività diverse dal piano di appoggio in modo da poterlo distinguere e metterlo a fuoco correttamente. La corretta messa a fuoco dello strumento è importante, in quanto la sfocatura causa errori di misura. A seguire sono riportati degli esempi di come appare la visuale della termocamera prima e dopo la messa a fuoco (Figura 8, Figura 9).

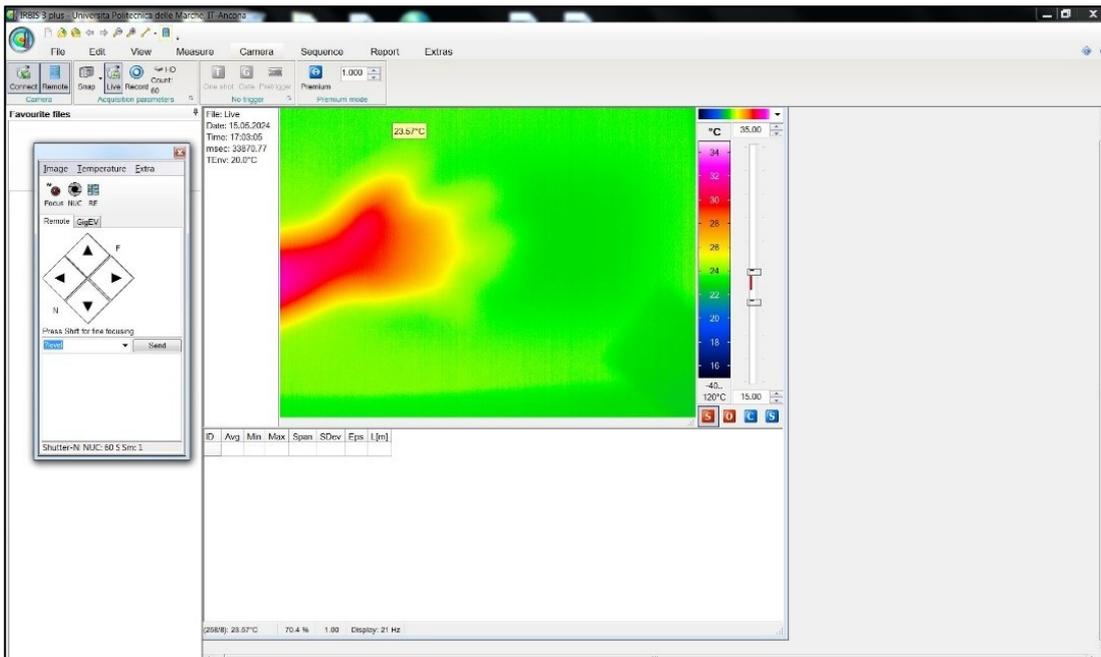


Figura 8 Visuale prima della messa a fuoco della termocamera.

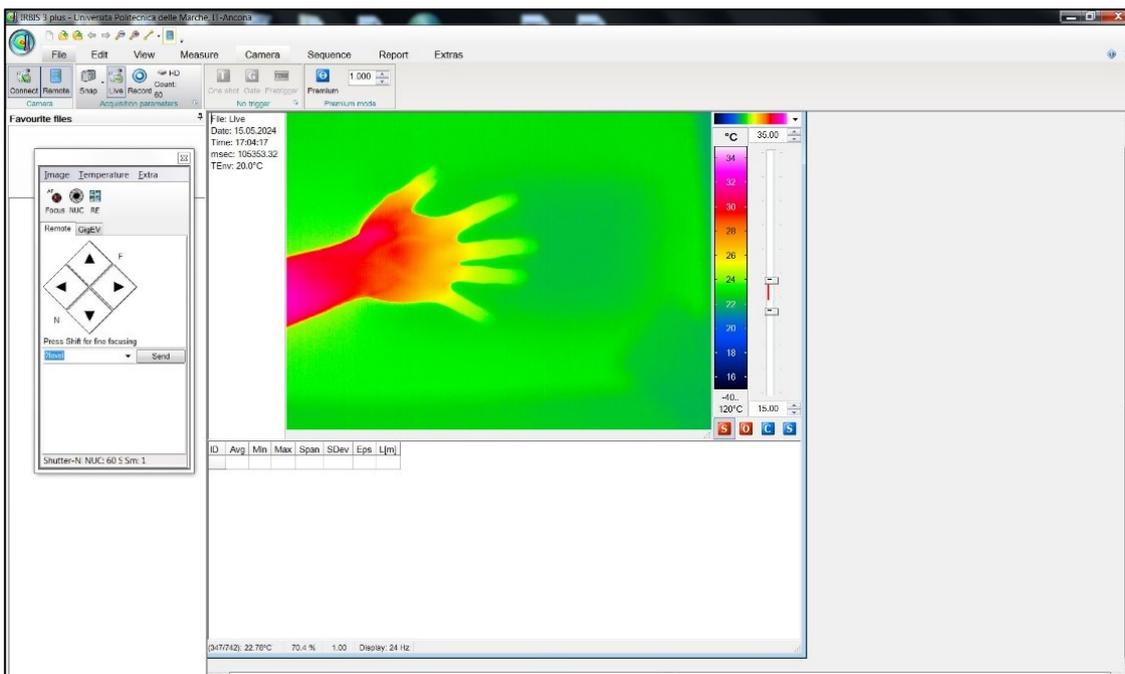


Figura 9 Visuale dopo la messa a fuoco della termocamera.

Terminata la fase di preparazione iniziale dello strumento, si impostano sul software i parametri per l'acquisizione in sequenza (vedere Figura 11). Come prima cosa attraverso l'apposita funzione si seleziona sul campione l'area su cui è stato applicato il riferimento ad emissività nota, e si imposta un'emissività globale pari a quella del riferimento. In questo modo si ha una misura della temperatura reale del provino. Fatto ciò, si imposta la zona così selezionata come controllo di temperatura, in modo che quando il campione raggiunge un certo livello termico, l'acquisizione in sequenza dei termogrammi parte automaticamente. Una volta impostato il parametro per l'inizio delle acquisizioni si procede con l'impostazione della durata della sequenza di acquisizione e la frequenza con cui scattare i termogrammi. È stata scelta la durata totale di un minuto per salvare il

maggior numero di dati possibili, e la frequenza di acquisizione delle immagini è stata impostata a un termogramma al secondo. Dato l'elevato numero di campioni e quindi di test da eseguire, è essenziale garantire l'univoca identificazione dei vari test eseguiti sui vari provini, è per questo che per ogni prova è stato impostato il nome della sequenza acquisita. Per semplicità si è fatto uso dei codici campione stabiliti nelle fasi precedenti, più un'estensione che indica il numero del test eseguito (Figura 10).

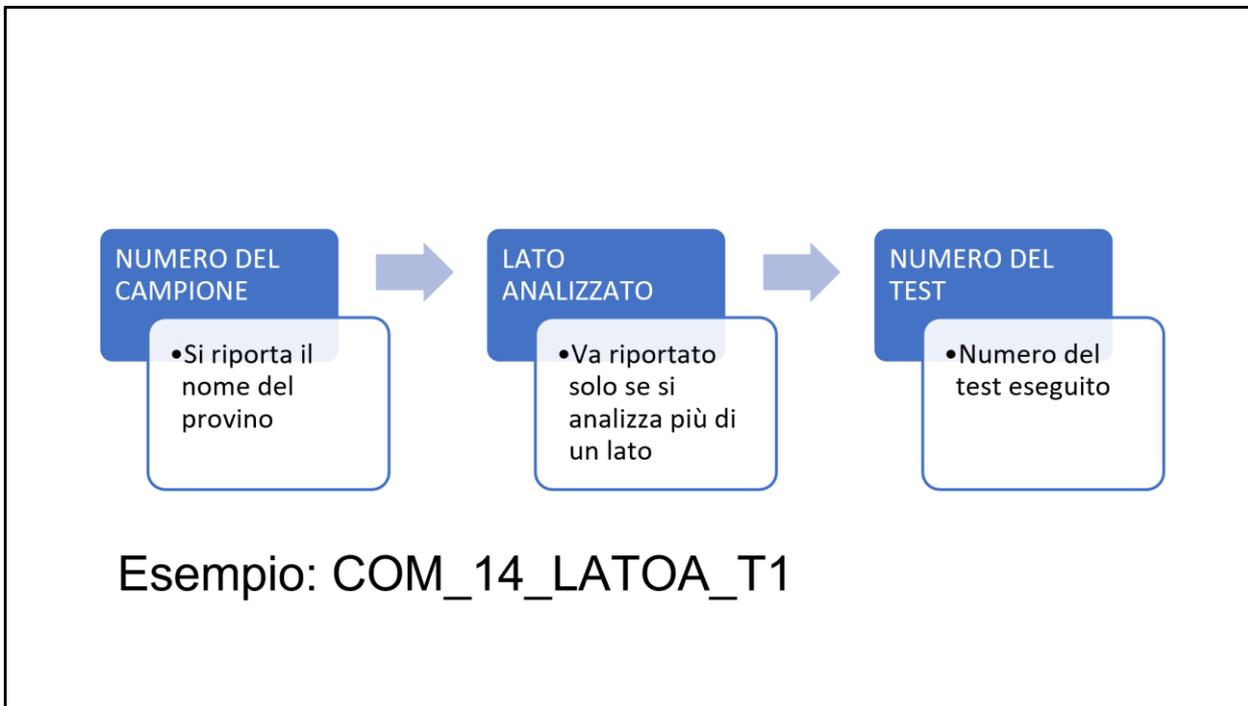


Figura 10 Schematizzazione della nomenclatura delle prove.

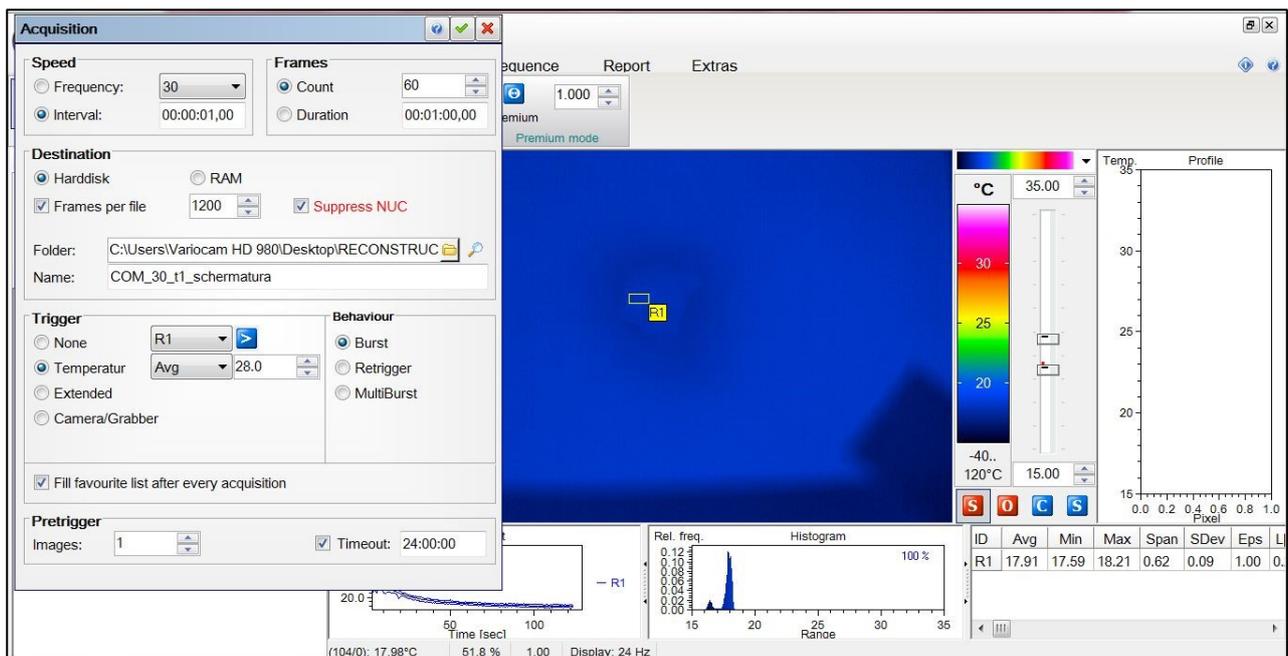


Figura 11 Impostazione dei parametri di acquisizione, l'area R1 è il riferimento termico impostato per l'inizio della prova.

Impostati i parametri di acquisizione si procede con l'esecuzione della prova. Si inserisce il provino all'interno della camera di riscaldamento e si accendono le lampade. Per la corretta stima dell'emissività del campione si riscalda fino al raggiungimento della temperatura di prova data dalla seguente relazione (Equazione 3):

$$T_{PROVA} = T_{AMB} + \Delta T \quad \text{con } \Delta T = 8 \div 12^{\circ}C$$

Equazione 3

Grazie ai parametri impostati in precedenza, quando la temperatura sull'area su cui è presente il riferimento ad emissività nota raggiunge un certo valore prefissato, inferiore a quello di prova, comincia in automatico il salvataggio della sequenza delle immagini termiche. In questo modo acquisendo anche le ultime fasi del riscaldamento, si ha la certezza di aver acquisito l'intera fase di raffreddamento, che rappresenta la fase utile per la stima dell'emissività del materiale. Quando la temperatura raggiunge il valore di prova, si spengono le lampade e si inserisce lo schermo all'interno della camera di riscaldamento (Figura 12, Figura 13). Tale procedura va svolta il più rapidamente possibile avendo cura di posizionare lo schermo senza coprire o spostare il provino. Terminata l'acquisizione si rimuove il provino dalla camera di riscaldamento. Prima di procedere con altre prove è necessario far raffreddare l'interno della camera di riscaldamento, in modo da tornare alla temperatura di inizio prova, ovvero alla temperatura ambiente. Per ridurre i tempi di attesa si è fatto uso di un ventilatore per raffreddare più velocemente la camera. Quando la camera si è raffreddata è possibile cominciare con un'altra prova sullo stesso campione, se intanto questo si è raffreddato fino alla temperatura ambiente, altrimenti è necessario passare a un altro provino. Per ogni campione vengono realizzate tre prove, se le caratteristiche del provino sono uniformi su tutte le sue superfici, se no è necessario fare tre prove per ogni superficie diversa dalle altre.



Figura 12 Inserimento dello schermo nella camera di riscaldamento dopo lo spegnimento delle lampade.

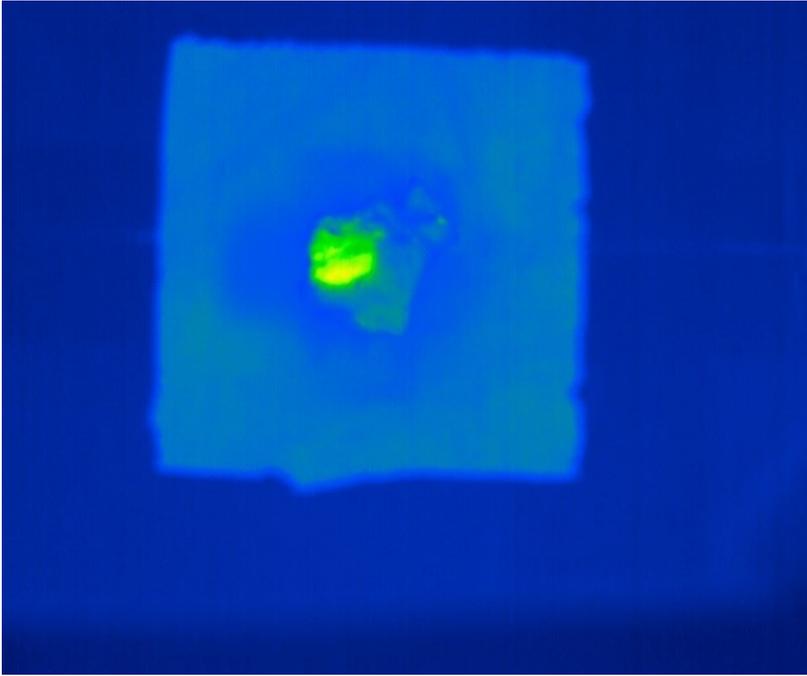


Figura 13 Visuale della termocamera dopo l'inserimento dello schermo.

Terminata la fase di acquisizione dei dati grezzi, i vari termogrammi ottenuti sono stati convertiti in file CSV per proseguire poi con l'analisi dei dati termici. Ogni immagine è stata dunque convertita in una matrice, in cui ogni cella rappresenta un pixel, e ad ogni pixel è associato un valore di temperatura. Per ogni sequenza acquisita si hanno 60 immagini da processare, e ogni immagine ha una risoluzione di 1024x768 pixel. Risulta evidente la necessità di sviluppare dei sistemi di calcolo dedicati per automatizzare il più possibile l'analisi, per far ciò sono stati implementati dei codici di calcolo in linguaggio Python. I codici sviluppati, a partire dai file CSV, ricostruiscono l'immagine termica, in modo da poter selezionare su essa due aree di lavoro: l'area per la misura della temperatura reale, che viene selezionata nella zona su cui è applicata la vernice o il nastro ad emissività nota, e una seconda area per la misura della temperatura apparente del campione (viene detta apparente perché non è il valore reale della temperatura del provino, poiché la misura è influenzata dalla differenza di emissività che c'è tra riferimento e materiale). Dopo aver selezionato le aree di lavoro sull'immagine termica, come mostrato in Figura 14, il codice calcola l'andamento temporale della temperatura media delle due aree. Prima di eseguire il codice sull'intera sequenza di termogrammi, vanno scartati i frame scattati durante l'inserimento dello schermo nei quali questo copre il provino.

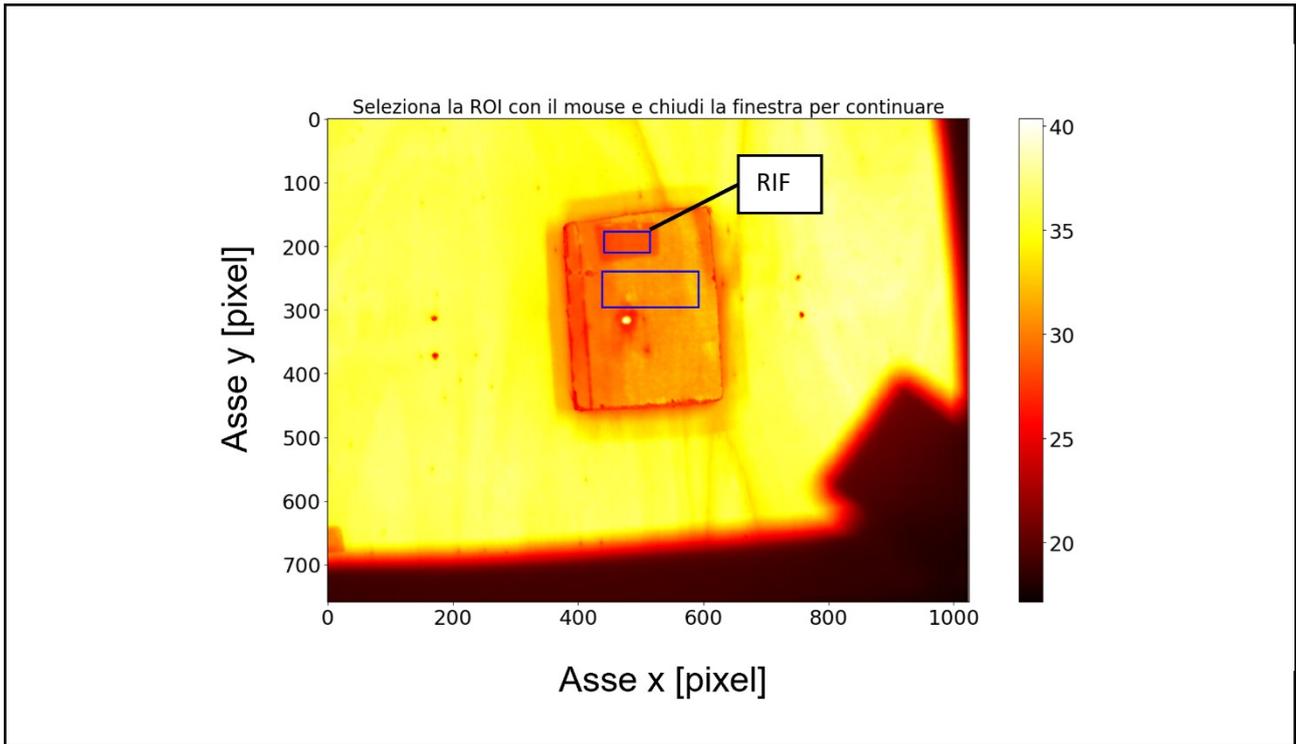


Figura 14 Selezione dell'area di riferimento e del campione sull'immagine termica.

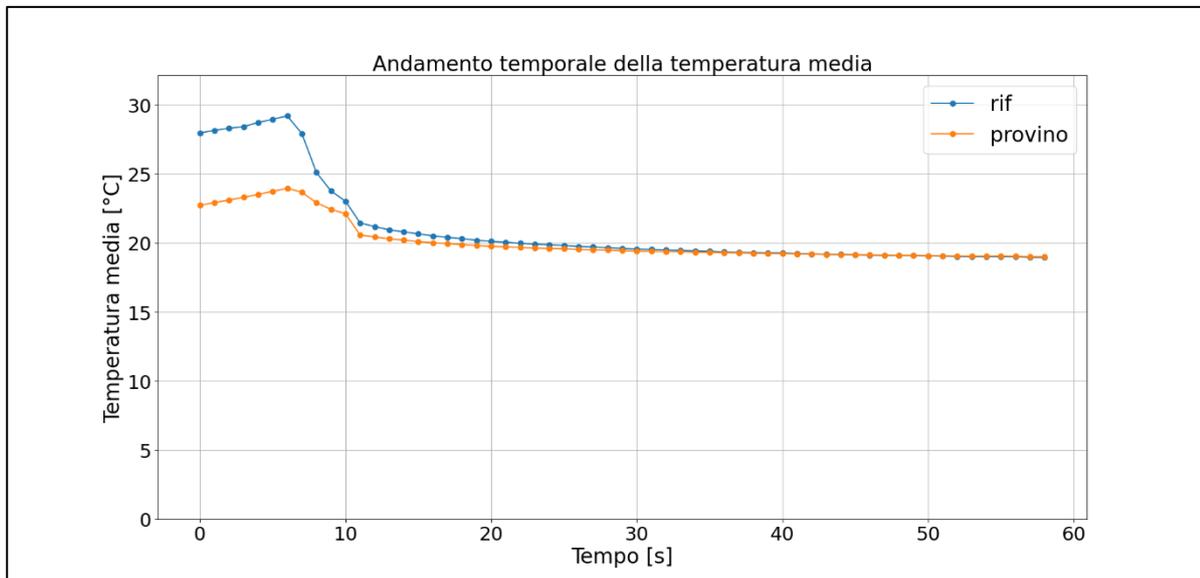


Figura 15 Esempio di andamento temporale delle temperature ottenuto come primo output del codice.

Ottenuto l'andamento temporale delle temperature è possibile dunque calcolare l'emissività del materiale. Tale calcolo si basa sul confronto tra temperatura del riferimento e la temperatura apparente del provino. Il calcolo è stato implementato tramite codici Python che si basano sulla seguente formula (Equazione 4):

$$\varepsilon = \left(\frac{T_{provino} + 273,15}{T_{RIF} + 273,15} \right)^4 \varepsilon_{RIF}$$

Equazione 4

La T_{RIF} rappresenta il valore della temperatura media calcolata sull'area dove è stato applicato il riferimento ad emissività nota, mentre $T_{provino}$ rappresenta il valore della temperatura media calcolato su una superficie del campione dove non è stato applicato il riferimento; infine la ε_{RIF} è il valore dell'emissività del riferimento.

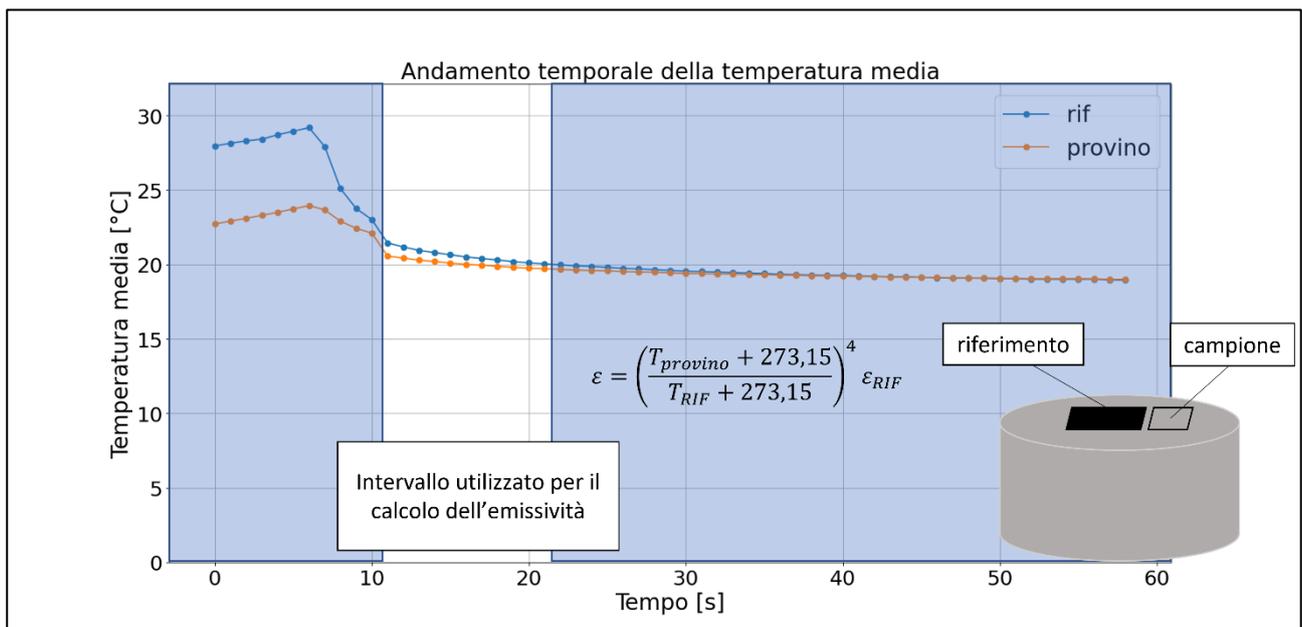


Figura 16 Schematizzazione delle temperature e dell'intervallo temporale utilizzati per calcolare l'emissività.

Per il calcolo dell'emissività sono stati considerati i primi dieci termogrammi scattati dopo l'inserimento dello schermo, ciò dovrebbe eliminare eventuali incertezze dovute alla riflessione delle lampade ancora calde sul provino. In Figura 16 viene illustrato direttamente sul grafico dell'andamento temporale della temperatura media l'intervallo utile al calcolo dell'emissività. A seguito della selezione degli scatti di interesse, il codice calcola su ogni frame, la temperatura media sull'area di riferimento e sull'area di lavoro, fatto ciò un secondo codice permette di ottenere per ogni frame il valore di emissività applicando l'Equazione 4. Vengono così calcolati, per ogni test eseguito sul campione, dieci valori di emissività corrispondenti ai dieci frame selezionati. I valori di emissività ottenuti per ogni test su ogni provino sono stati poi raggruppati all'interno di macrocategorie, che rappresentano le principali categorie di materiale che si trovano nei rifiuti da costruzione e demolizione. Per ogni classe di materiale è stata calcolata l'emissività media, massima, minima e la deviazione standard, poi tali risultati sono stati confrontati con quelli già presenti in letteratura. Di seguito è riportata la formula utilizzata per il calcolo della deviazione standard (Equazione 5). Il simbolo μ è la media dei valori di emissività per quella classe di materiale e x_i è il singolo valore di emissività.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}$$

Equazione 5

Questa procedura è stata applicata a tutte le categorie di materiale, fatta eccezione dei rifiuti misti. I rifiuti misti sono un insieme eterogeneo di materiali di diversa natura, che di solito si trovano nei rifiuti da costruzione e demolizione (Figura 17). La procedura di acquisizione adottata è molto simile a quella utilizzata per gli altri campioni, l'unica differenza sta nel rimescolare il campione tra una prova e l'altra, per cercare di comprendere nell'acquisizione tutti i materiali presenti nei rifiuti misti. Fornire un unico valore di emissività per tale categoria di campione risulta poco interessante. Allora si è deciso di implementare un codice leggermente differente che permette di selezionare in automatico diverse aree di lavoro: di cui una è riferita alla zona su cui è applicato il riferimento ad emissività nota, sulle altre n-1 aree invece si calcola l'emissività (Figura 18), in output il codice fornisce l'istogramma che rappresenta la distribuzione in frequenza delle varie emissività calcolate sulle singole aree (Figura 19). È stato elaborato infine un codice, che sulla base dei risultati ottenuti per tutti i test calcola emissività media, massima e minima, e la deviazione standard, inoltre costruisce l'istogramma complessivo della distribuzione in frequenza delle emissività (Figura 20).



Figura 17 Composizione dei rifiuti misti.

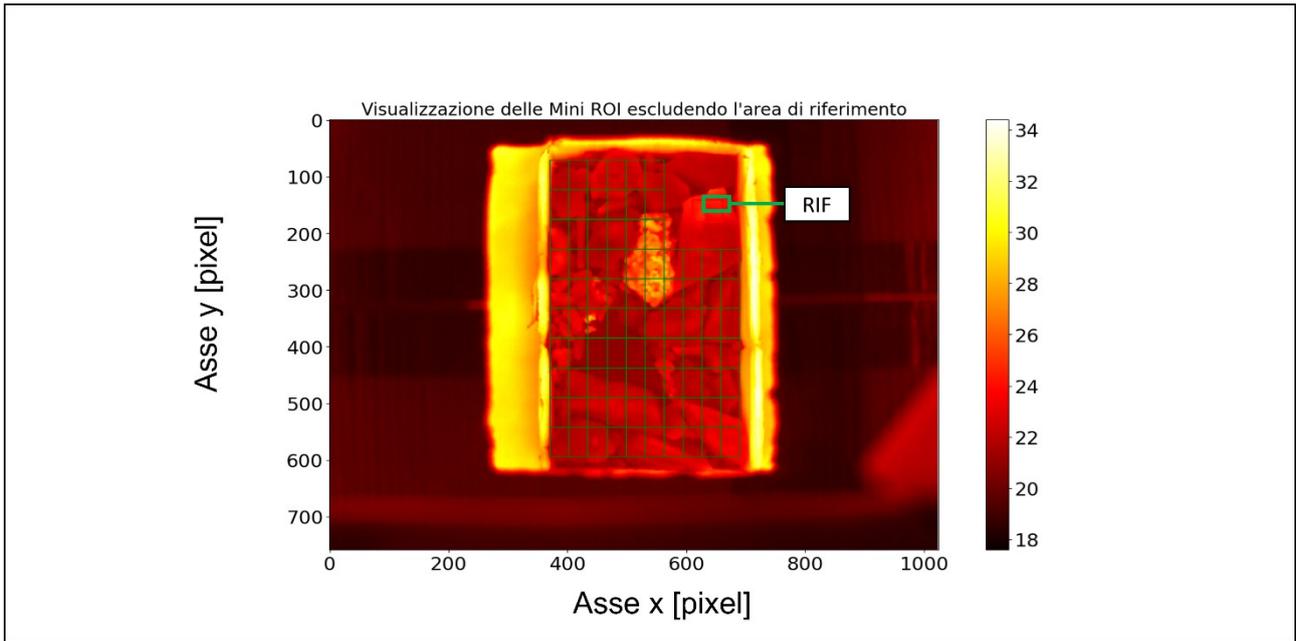


Figura 18 La figura illustra come opera il codice per i rifiuti misti.

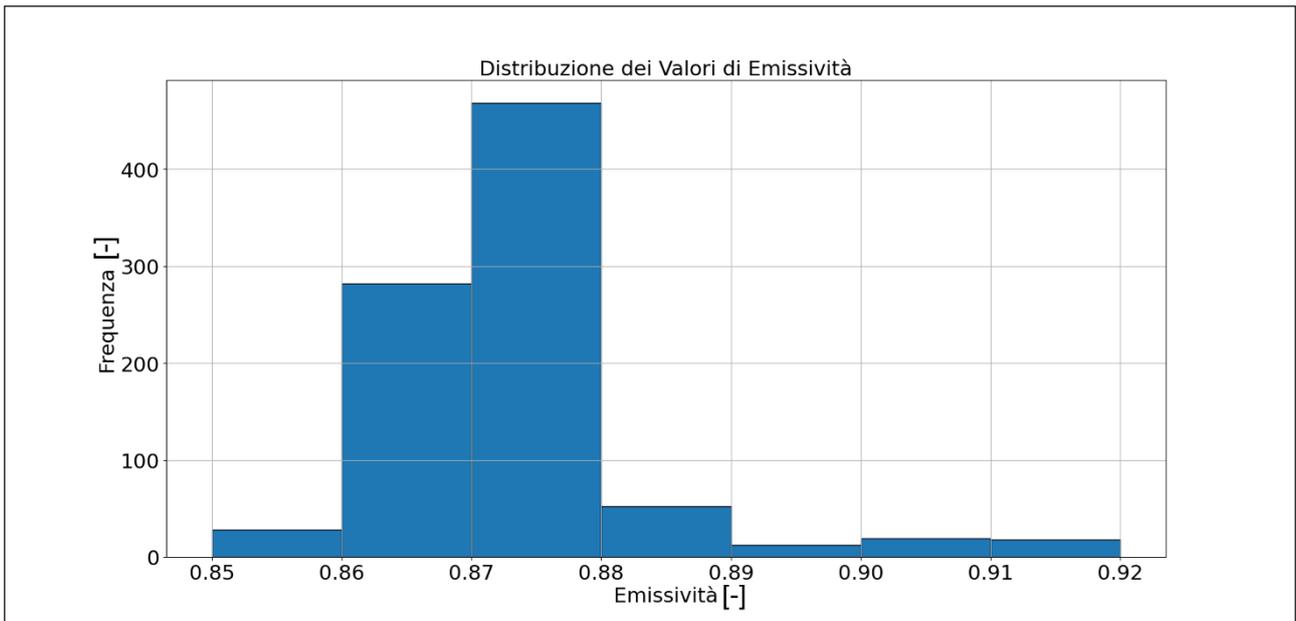


Figura 19 Esempio di output fornito dal codice che elabora i rifiuti misti.

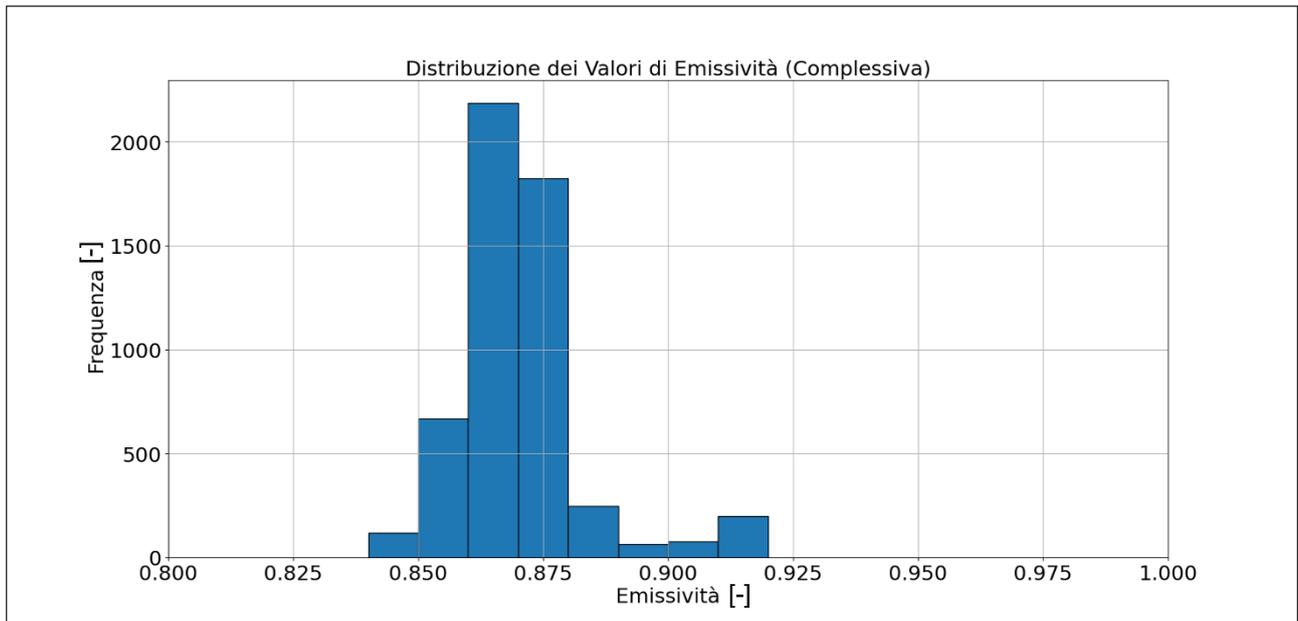


Figura 20 Istogramma complessivo della distribuzione in frequenza delle emissività.

Ora che l'intera procedura di prova è stata esplicitata per le diverse categorie di campione si procede illustrando nel prossimo capitolo i risultati ottenuti, commentandoli e confrontandoli con i valori di riferimento presenti in letteratura.

2. RISULTATI

Prima di riportare la tabella riassuntiva contenente i valori di emissività media, massima e minima e la deviazione standard dell'emissività calcolata per ogni categoria di materiale, si vuole illustrare i risultati ottenuti per alcuni campioni rappresentativi delle varie classi di appartenenza. In seguito, sarà riportata per ciascun campione: l'immagine visibile e il termogramma, l'andamento della temperatura media e apparente nel tempo per le tre prove, e una tabella contenente i valori di emissività calcolati.

Di seguito sono riportate tutte le informazioni riguardo al campione COM_1, appartenente alla classe della plastica.



Figura 21 COM_1 immagine RGB, (plastica).

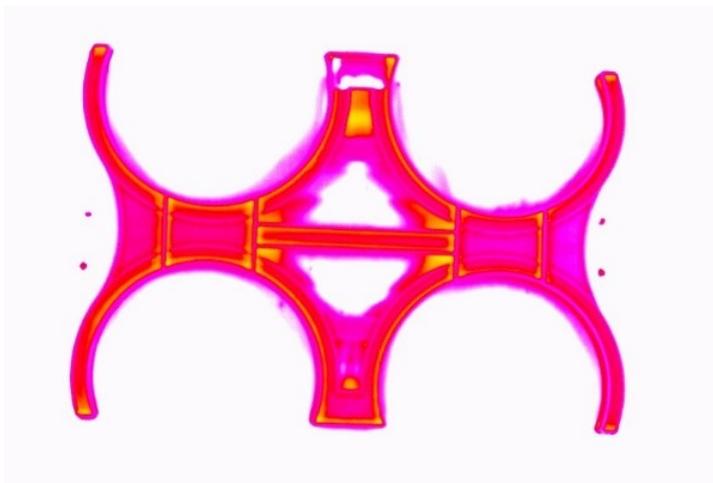


Figura 22 COM_1 termogramma, (plastica).

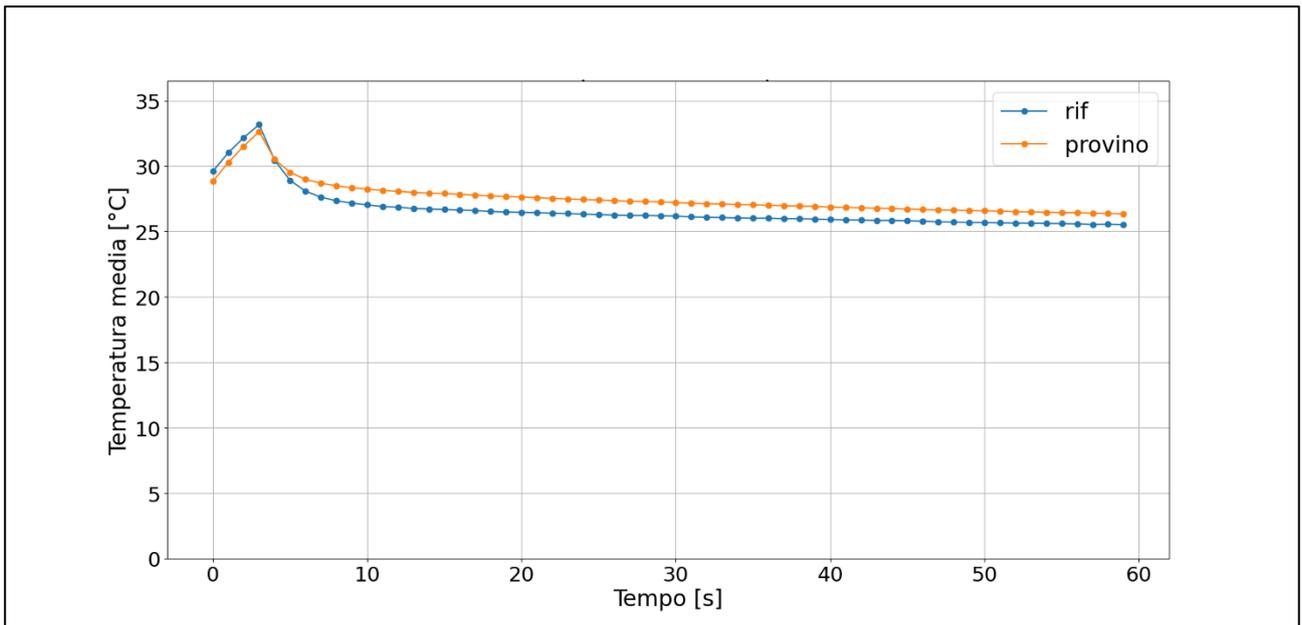


Figura 23 Andamento temporale delle temperature per COM_1_T1, (plastica).

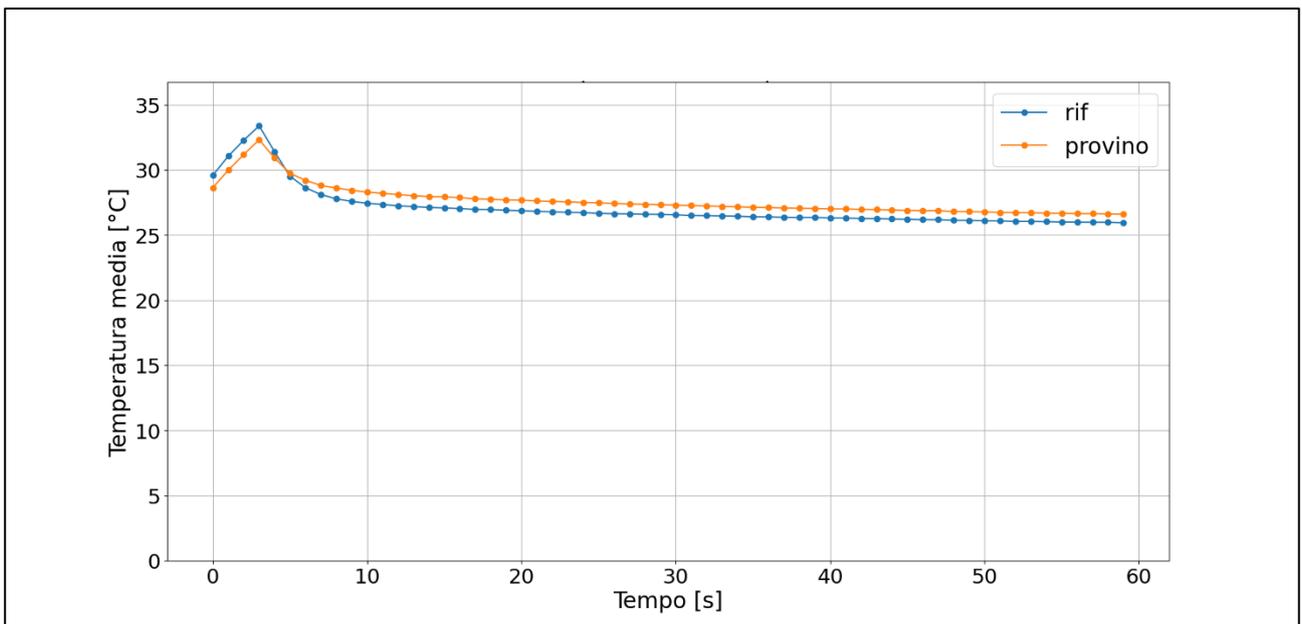


Figura 24 Andamento temporale delle temperature per COM_1_T2, (plastica).

Osservando gli andamenti nel tempo delle temperature, è possibile affermare che il materiale durante la fase di raffreddamento tende ad avere una temperatura maggiore rispetto al riferimento, avrà quindi un'emissività maggiore. Leggendo la Tabella 11 per le plastiche opache il valore di emissività previsto nella banda spettrale di riferimento è di 0,95 mentre l'emissività del nastro da termografia impiegato nelle prove è di 0,93 e ciò è congruo col comportamento termico osservato.

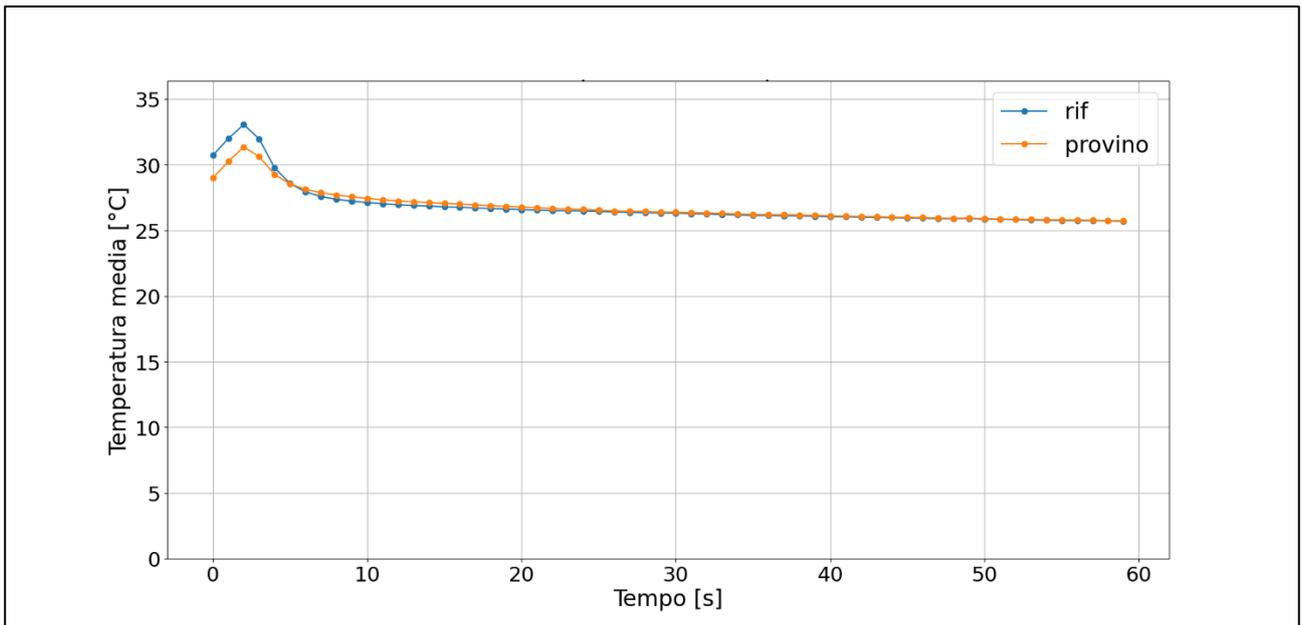


Figura 25 Andamento temporale delle temperature per COM_1_T3.

ϵ_{MEDIA}	0,94
ϵ_{MAX}	0,94
ϵ_{min}	0,93

Tabella 3 Valori di emissività [-] relativi a COM_1, (plastica).

Osservando i risultati ottenuti per COM_1, e confrontandoli col valore in Tabella 11 per la plastica opaca, possiamo affermare che l'emissività ottenuta è congrua col valore atteso.

Si discutono ora i risultati relativi al campione COM_19 appartenente alla categoria metallo.



Figura 26 COM_19 immagine RGB, (metallo).

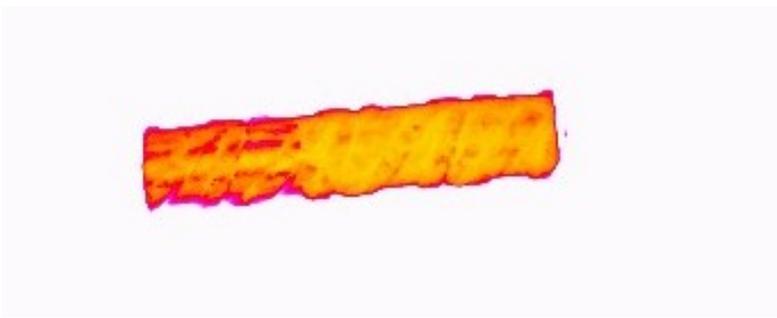


Figura 27 COM_19 termogramma, (metallo).

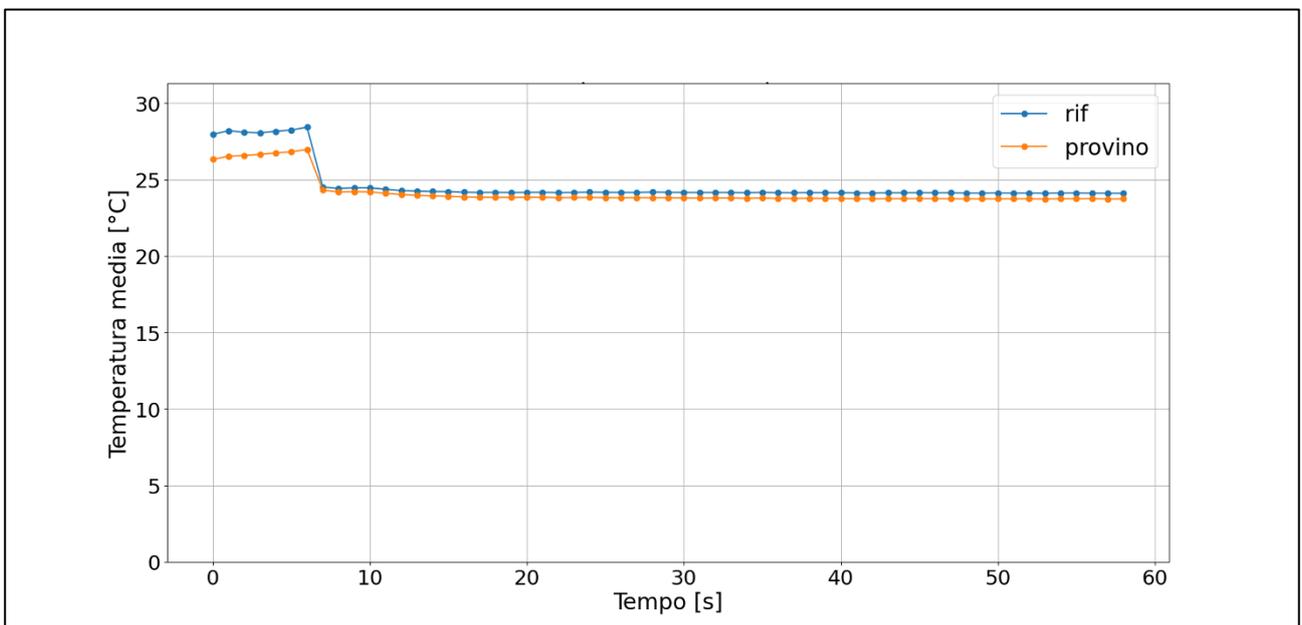


Figura 28 Andamento temporale delle temperature per COM_19_T1, (metallo).

Si osserva ora il comportamento termico del campione COM_19 appartenente alla classe del metallo. Possiamo osservare che un riscaldamento al di sotto dei 20 °C non è sufficiente per stimare accuratamente l'emissività del materiale, dato che la velocità di raffreddamento è talmente alta che la temperatura si uniforma molto rapidamente.

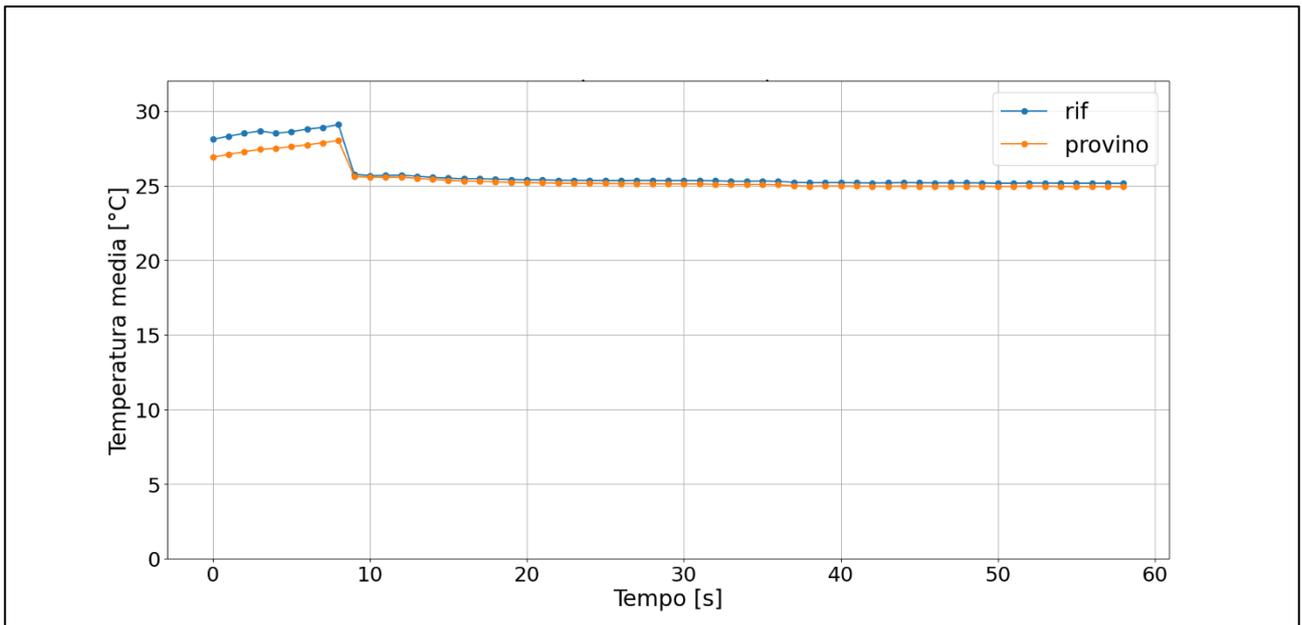


Figura 29 Andamento temporale delle temperature per COM_19_T2, (metallo).

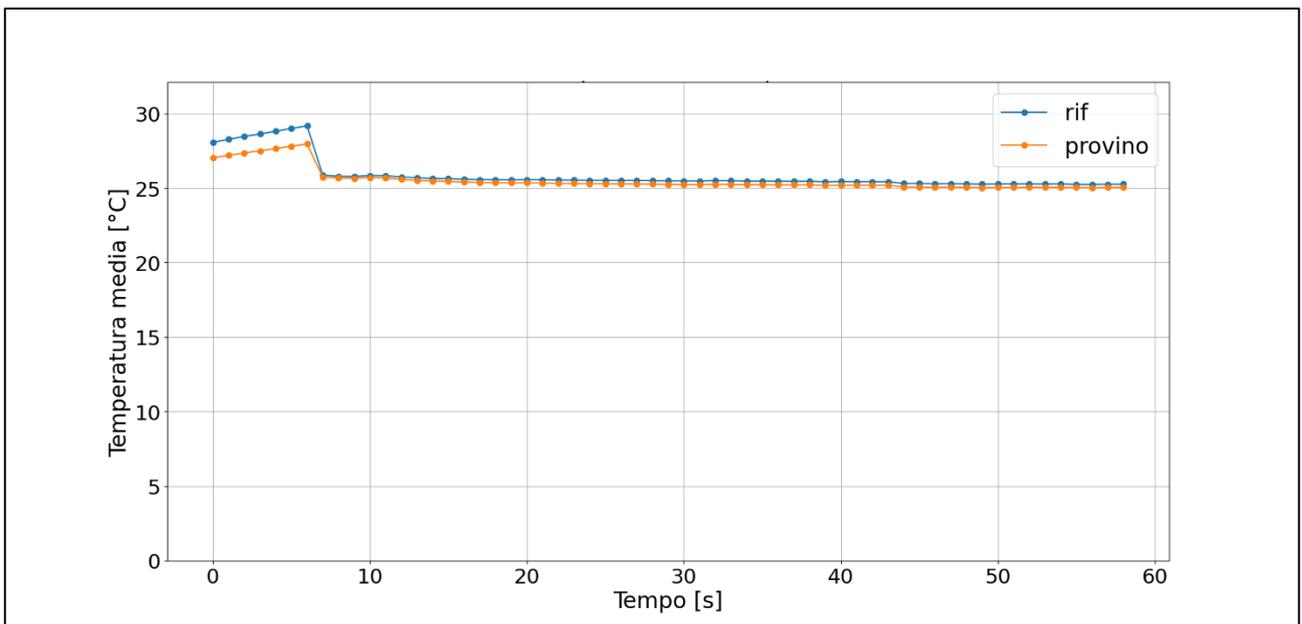


Figura 30 Andamento temporale delle temperature per COM_19_T3, (metallo).

ϵ_{MEDIA}	0,89
ϵ_{MAX}	0,89
ϵ_{min}	0,88

Tabella 4 Valori di emissività [-] relativi a COM_19, (metallo).

Il fatto che il riscaldamento utilizzato sia insufficiente è deducibile osservando i valori di emissività calcolati. Per l'acciaio ossidato nel range spettrale della termocamera, l'emissività varia tra 0,70 e 0,90. Il fatto di aver ottenuto un valore molto prossimo al valore massimo, mentre ci si aspettava un valore compreso tra 0,70 e 0,90, indica l'inadeguatezza del riscaldamento applicato.

Di seguito i risultati relativi a COM_29, appartenente alla categoria calcestruzzo.



Figura 31 COM_29 campione visto dal lato RGB, (calcestruzzo).

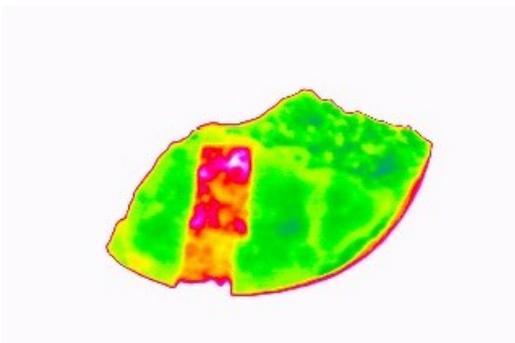


Figura 32 COM_29 termogramma, vista dall'alto, (calcestruzzo).

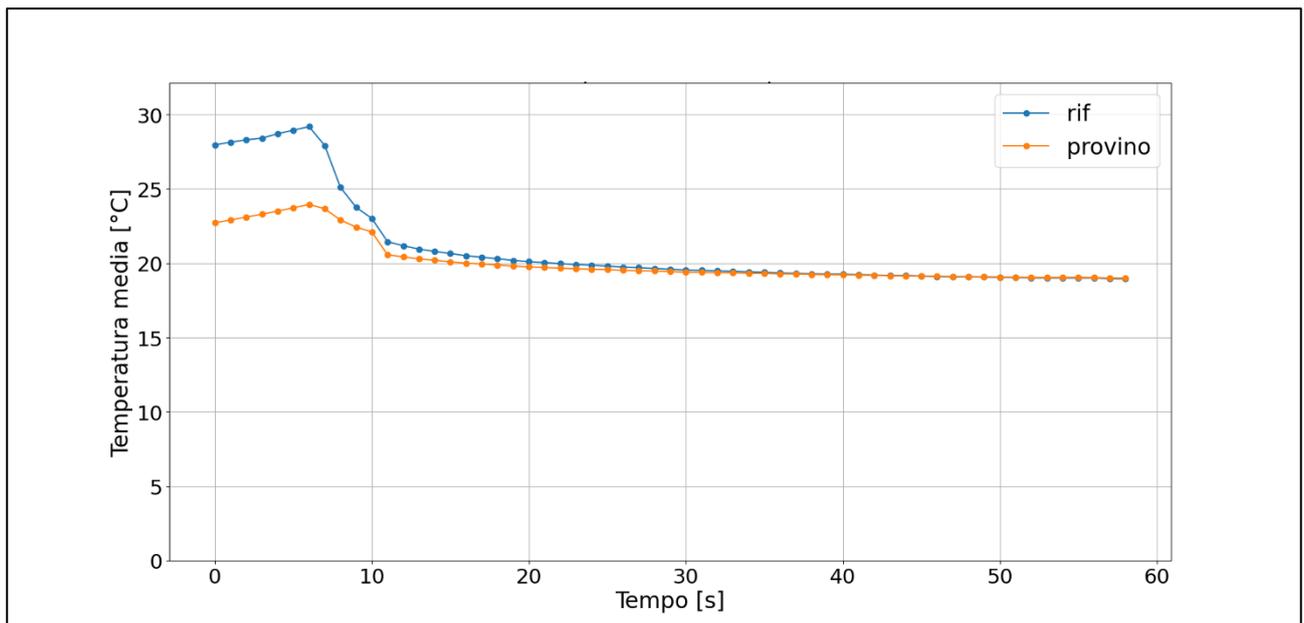


Figura 33 Andamento temporale delle temperature per COM_29_T1, (calcestruzzo).

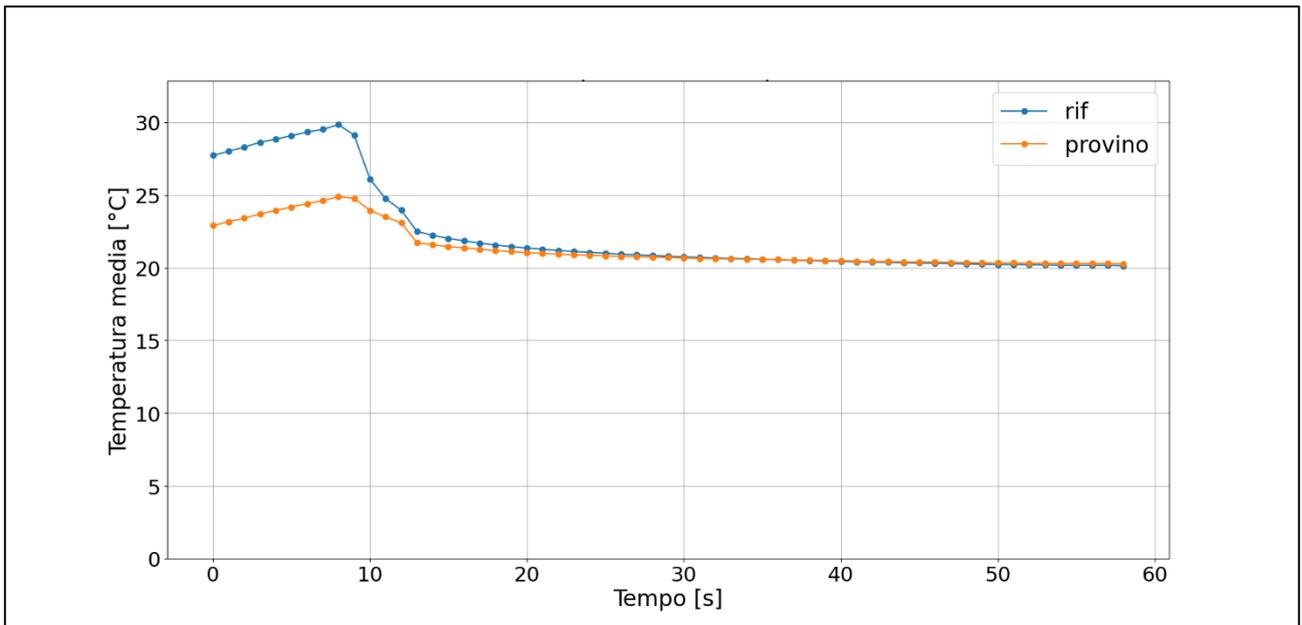


Figura 34 Andamento temporale delle temperature per COM_29_T2, (calcestruzzo).

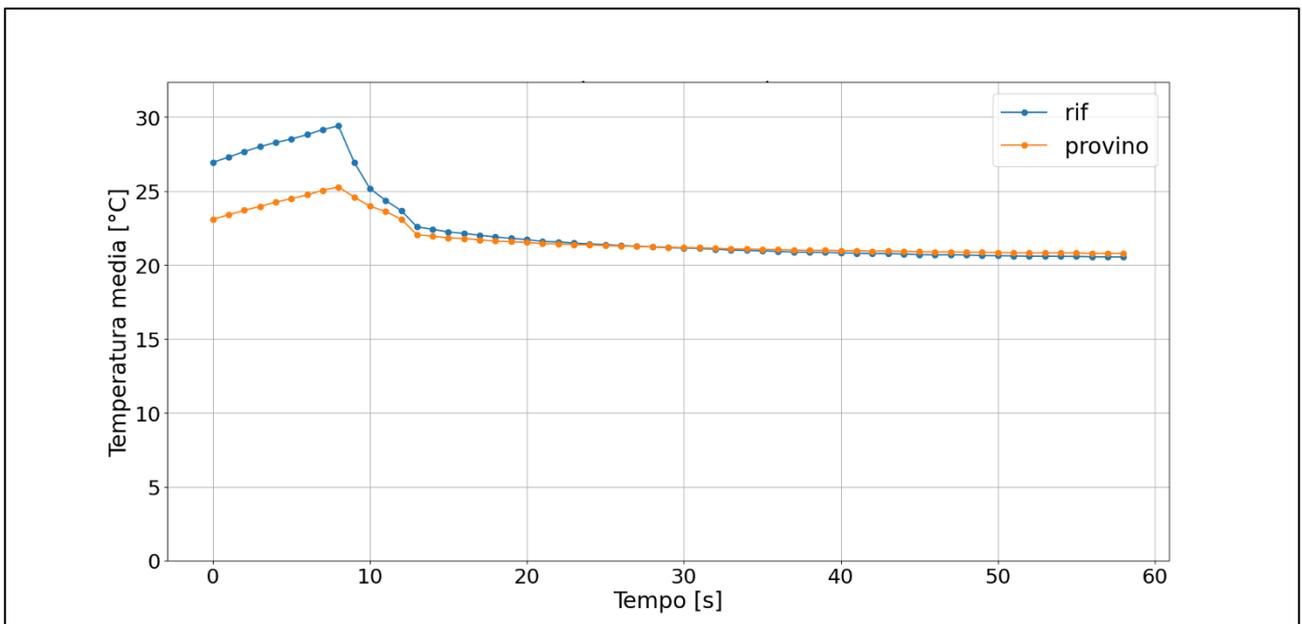


Figura 35 Andamento temporale delle temperature per COM_29_T3, (calcestruzzo).

ϵ_{MEDIA}	0,92
ϵ_{MAX}	0,93
ϵ_{min}	0,92

Tabella 5 Valori di emissività [-] relativi a COM_29, (calcestruzzo).

Osservando gli andamenti termici si può affermare che il riscaldamento applicato è sufficiente per determinare l'emissività. I valori di emissività ottenuti sono prossimi a quelli indicati in Tabella 11, però dato il lieve scostamento dal valore di riferimento si potrebbe pensare di realizzare in futuro prove sul calcestruzzo con riscaldamenti maggiori.

Si illustrano in seguito i risultati ottenuti per COM_28, appartenente alla categoria ceramica e piastrelle.



Figura 36 COM_28 immagine.

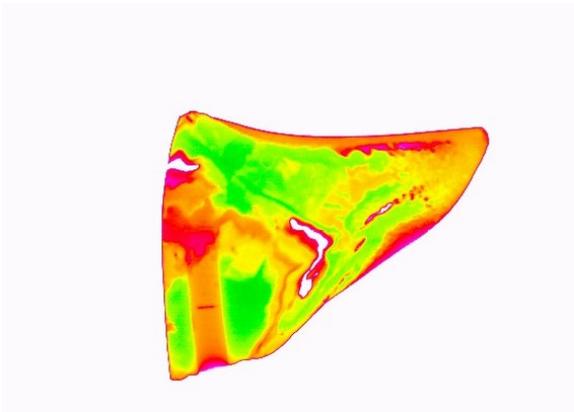


Figura 37 COM_28 termogramma.

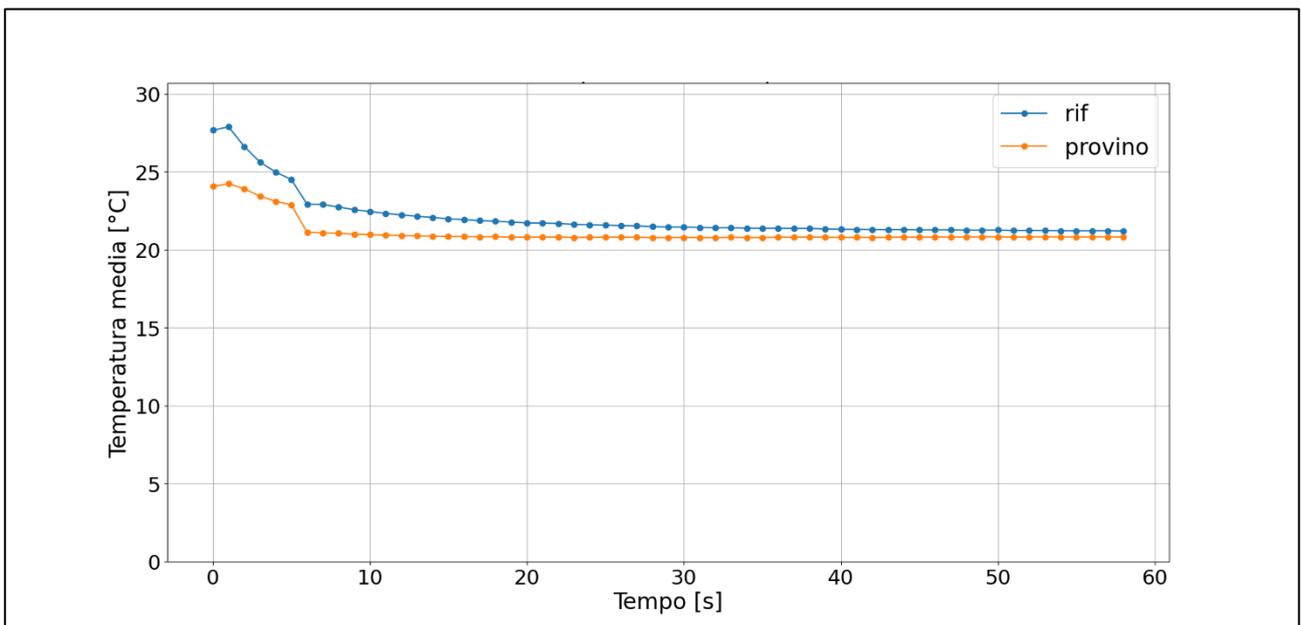


Figura 38 Andamento temporale delle temperature per COM_28_T1, (ceramica).

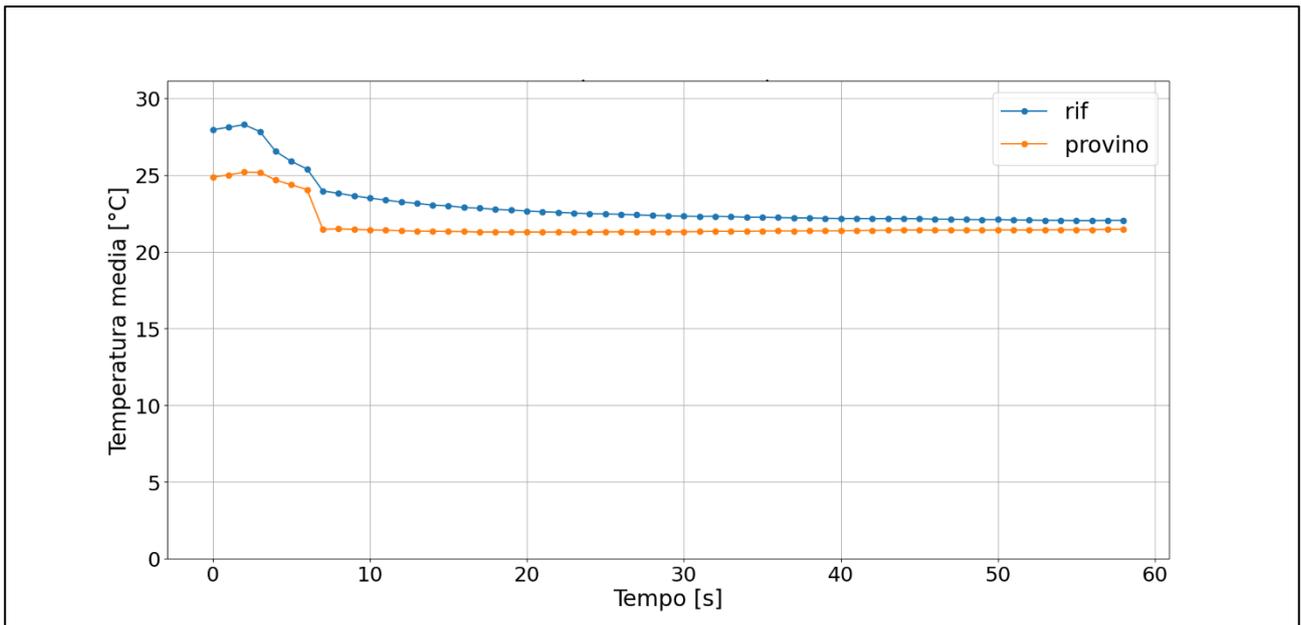


Figura 39 Andamento temporale delle temperature per COM_28_T2, (ceramica).

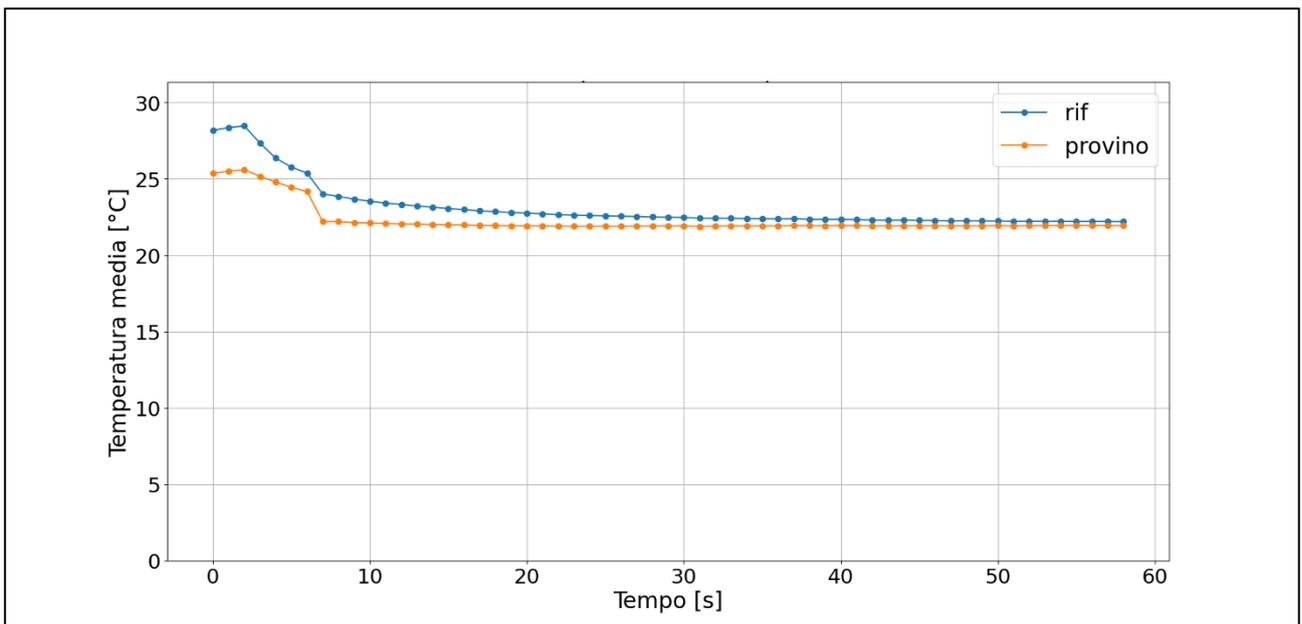


Figura 40 Andamento temporale delle temperature per COM_28_T3, (ceramica).

ϵ_{MEDIA}	0,91
ϵ_{MAX}	0,92
ϵ_{min}	0,90

Tabella 6 Valori di emissività [-] relativi a COM_28, (ceramica).

Il riscaldamento applicato garantisce una differenza di comportamento termico tra la superficie del provino e la superficie col riferimento anche dopo l'inserimento dello schermo, pertanto è possibile valutare in maniera accurata l'emissività. I valori ottenuti sono contenuti nel range di variabilità nella Tabella 11. Si assumono validi i valori di ϵ riportati in Tabella 11 anche se la banda spettrale della termocamera va da 8 a 12 μm .

A seguire vengono presentati i risultati ottenuti per COM_31, appartenente alla categoria mattoni.



Figura 41 COM_31 vista di lato.

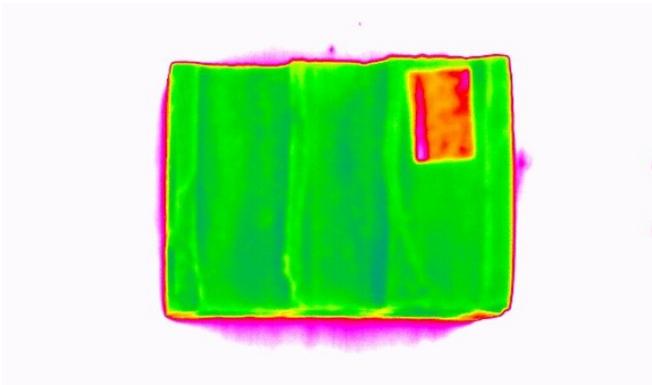


Figura 42 COM_31 termogramma, vista dall'alto.

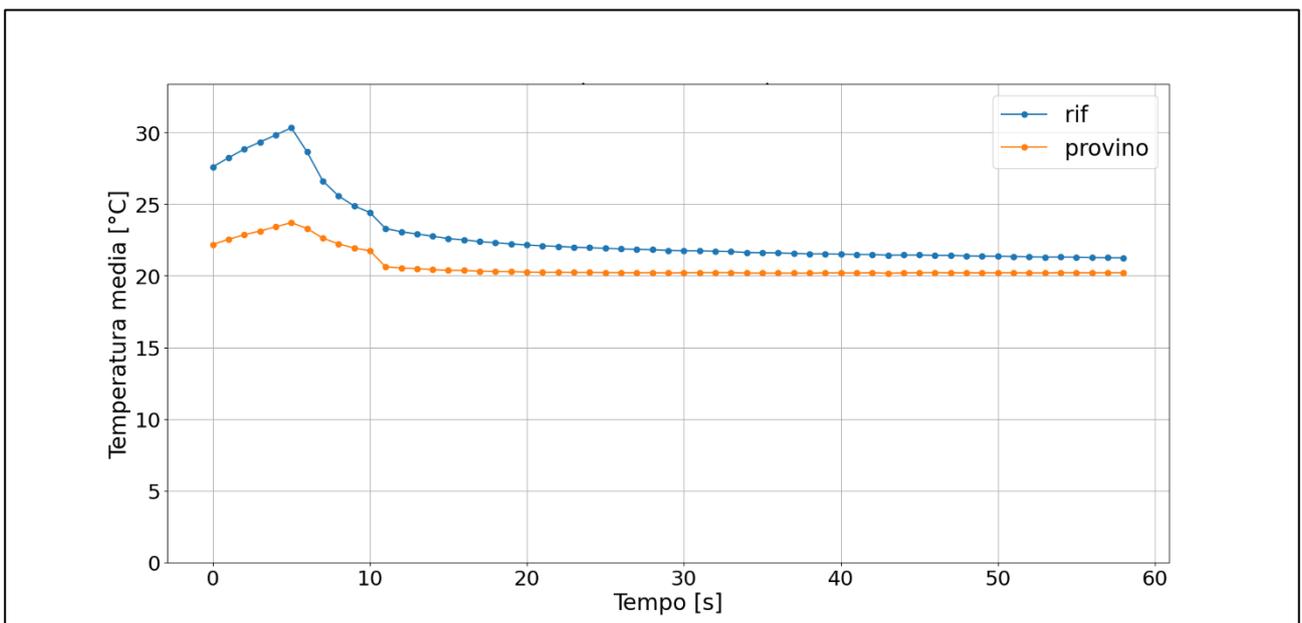


Figura 43 Andamento temporale delle temperature relativo a COM_31_T1, (mattoni).

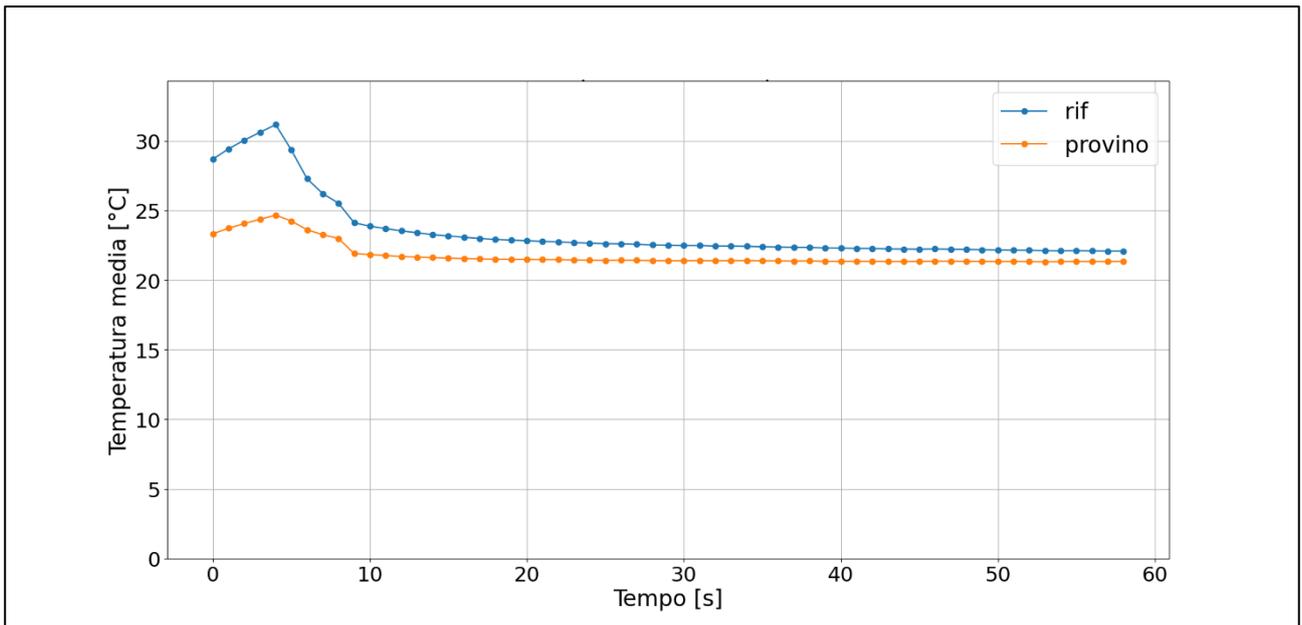


Figura 44 Andamento temporale delle temperature relativo a COM_31_T2, (mattoni).

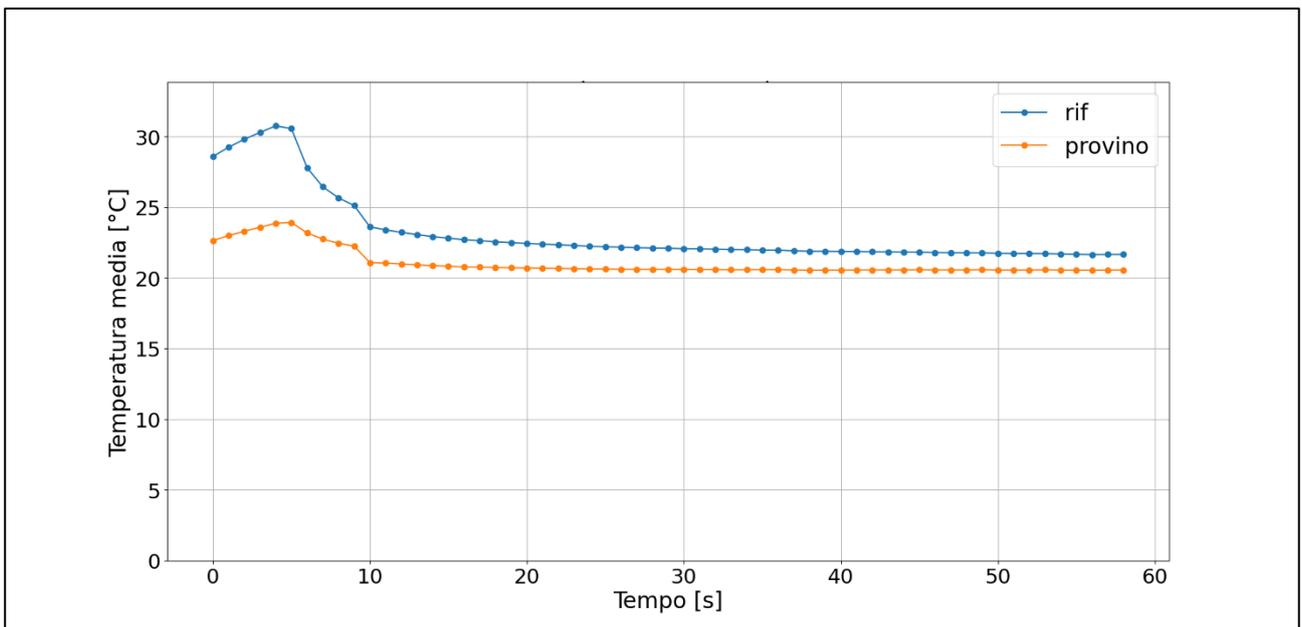


Figura 45 Andamento temporale delle temperature relativo a COM_31_T3, (mattoni).

ϵ_{MEDIA}	0,90
ϵ_{MAX}	0,91
ϵ_{min}	0,89

Tabella 7 Valori di emissività [-] relativi a COM_31, (mattoni).

Nella maggior parte delle prove il riscaldamento è stato tale da avere una differenza di comportamento tra le due aree di lavoro (riferimento e provino), ed è quindi sufficiente per determinare in maniera accurata l'emissività. I risultati ottenuti sono prossimi ai valori indicati in letteratura (Tabella 11).

Si riportano di seguito i risultati, e il comportamento osservato per COM_24 appartenente alla categoria legno.



Figura 46 COM_24 immagine RGB, (legno).

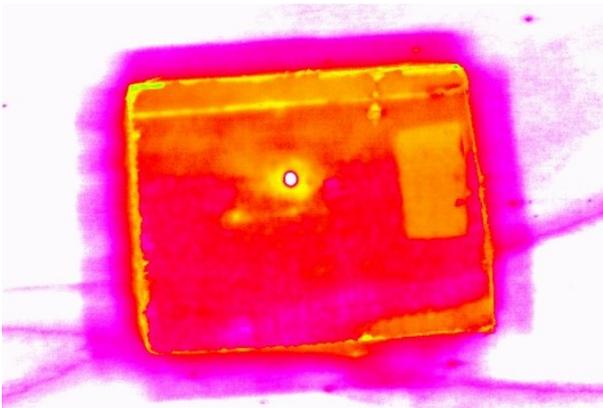


Figura 47 COM_24 termogramma, (legno).

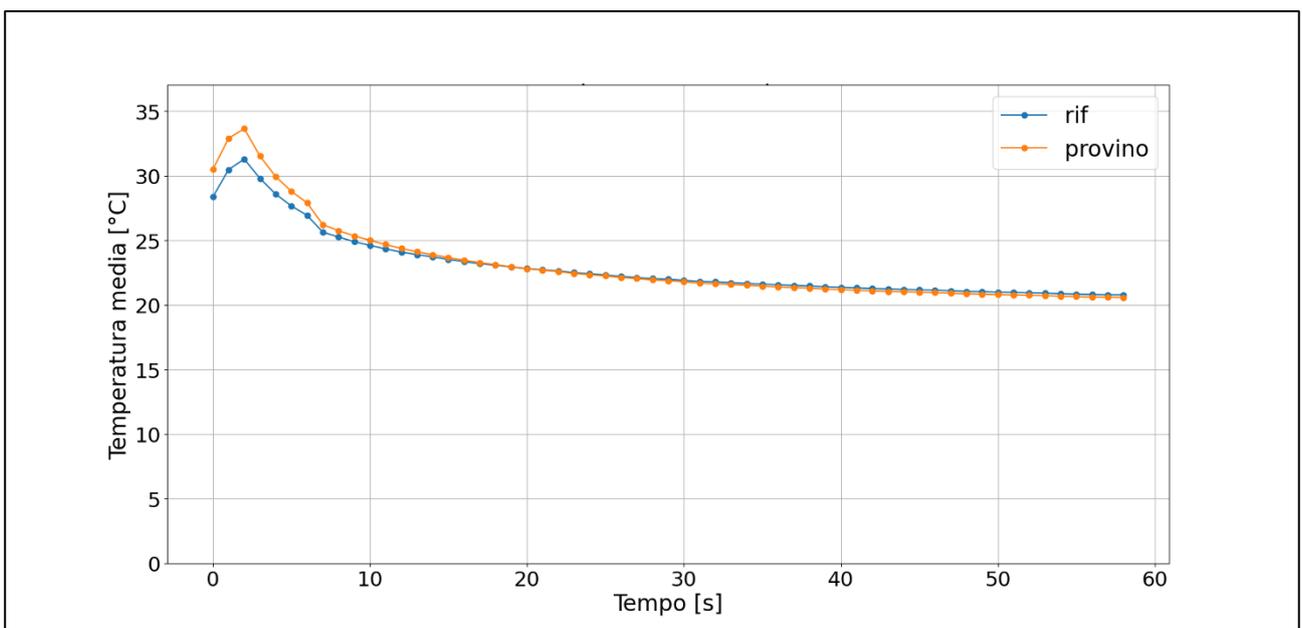


Figura 48 Andamento temporale delle temperature relativo a COM_24_T1, (legno).

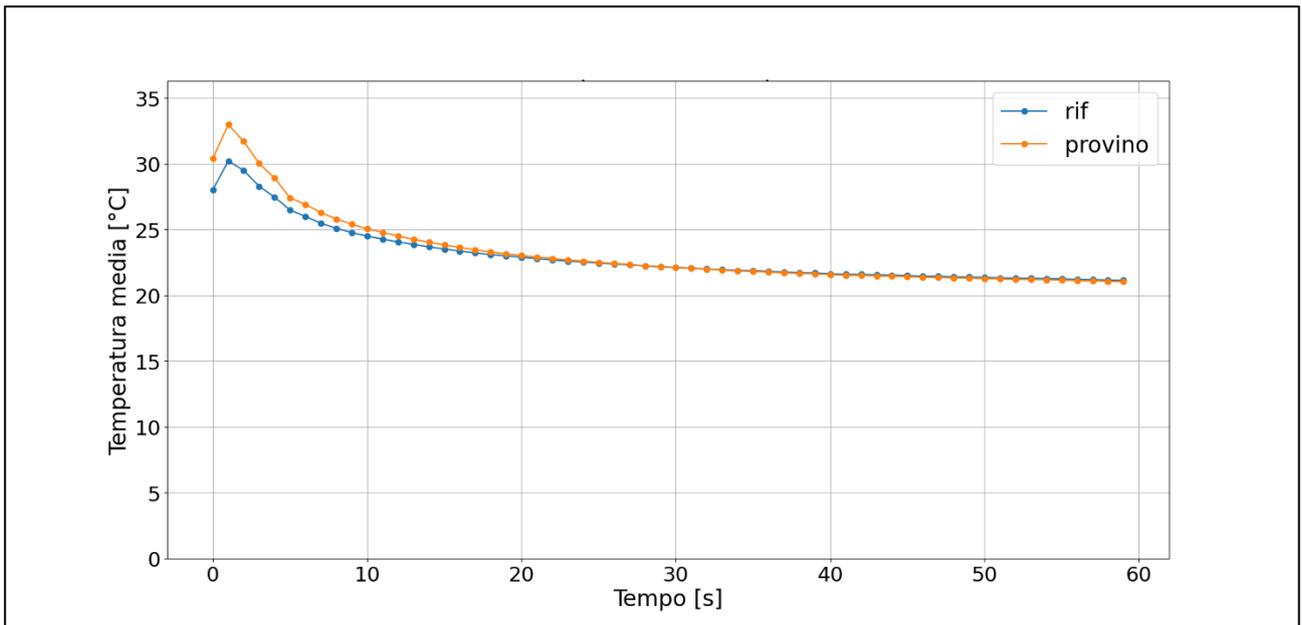


Figura 49 Andamento temporale delle temperature relativo a COM_24_T2, (legno).

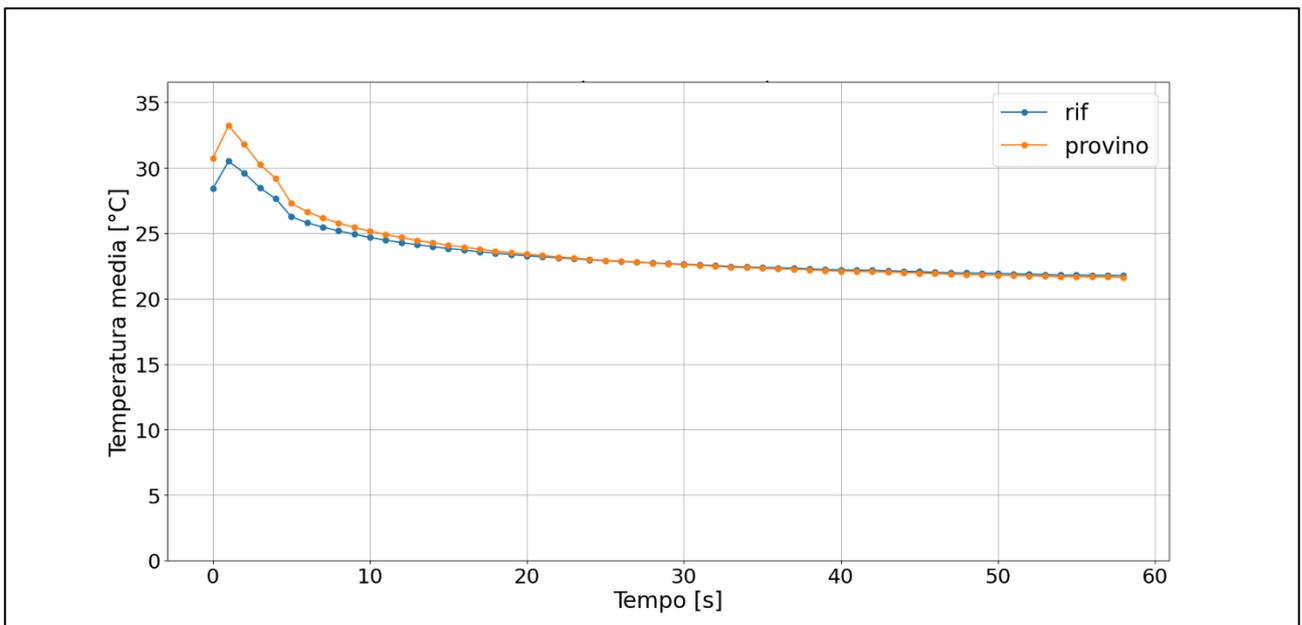


Figura 50 Andamento temporale delle temperature relativo a COM_24_T3, (legno).

ϵ_{MEDIA}	0,94
ϵ_{MAX}	0,94
ϵ_{min}	0,93

Tabella 8 Valori di emissività [-] relativi a COM_24, (legno).

C'è poca differenza di comportamento tra l'area col riferimento e l'area senza riferimento, ciò potrebbe essere dovuto ai trattamenti subiti dal legno (verniciatura), infatti i risultati ottenuti sono equiparabili ai valori di riferimento della vernice, piuttosto che ai valori indicati per il legno (Tabella 11).

Si discutono infine i risultati ottenuti per il campione COM_22, appartenente alla categoria carta e cartone.



Figura 51 COM_22 immagine RGB (lato A), (cartone).

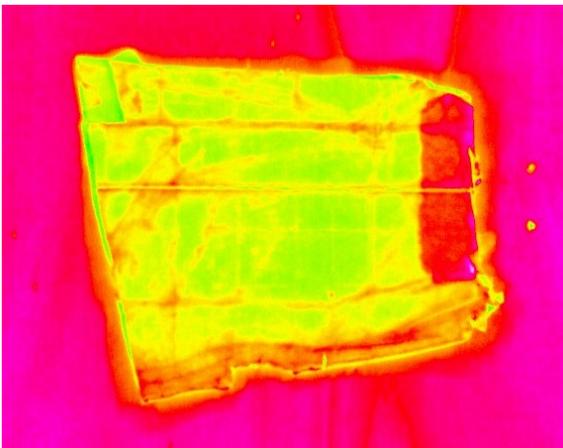


Figura 52 COM_22 termogramma (lato B), (cartone).

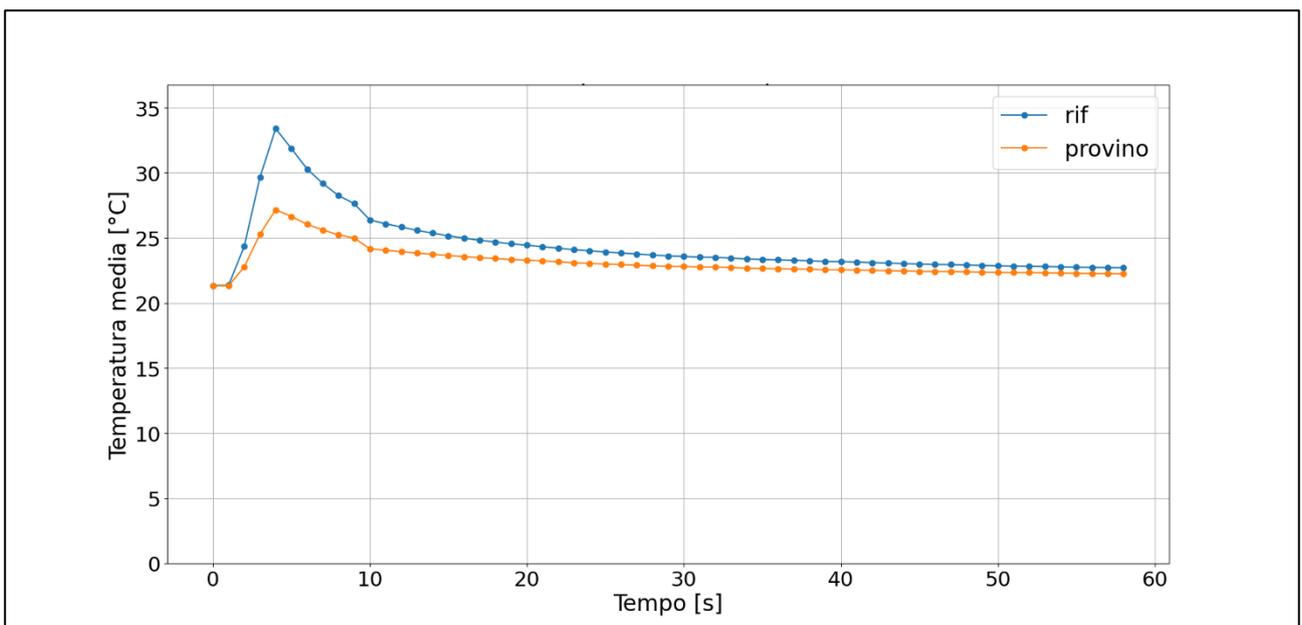


Figura 53 Andamento temporale delle temperature relativo a COM_22_T1, (cartone).

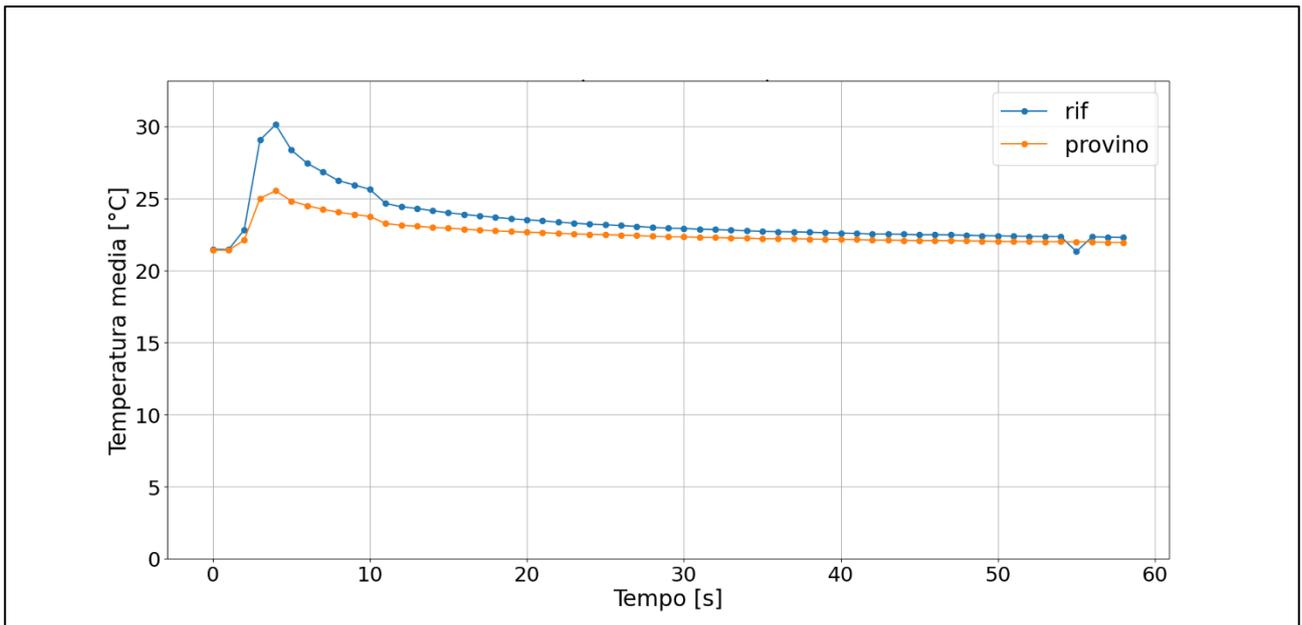


Figura 54 Andamento temporale delle temperature relativo a COM_22_T2, (cartone).

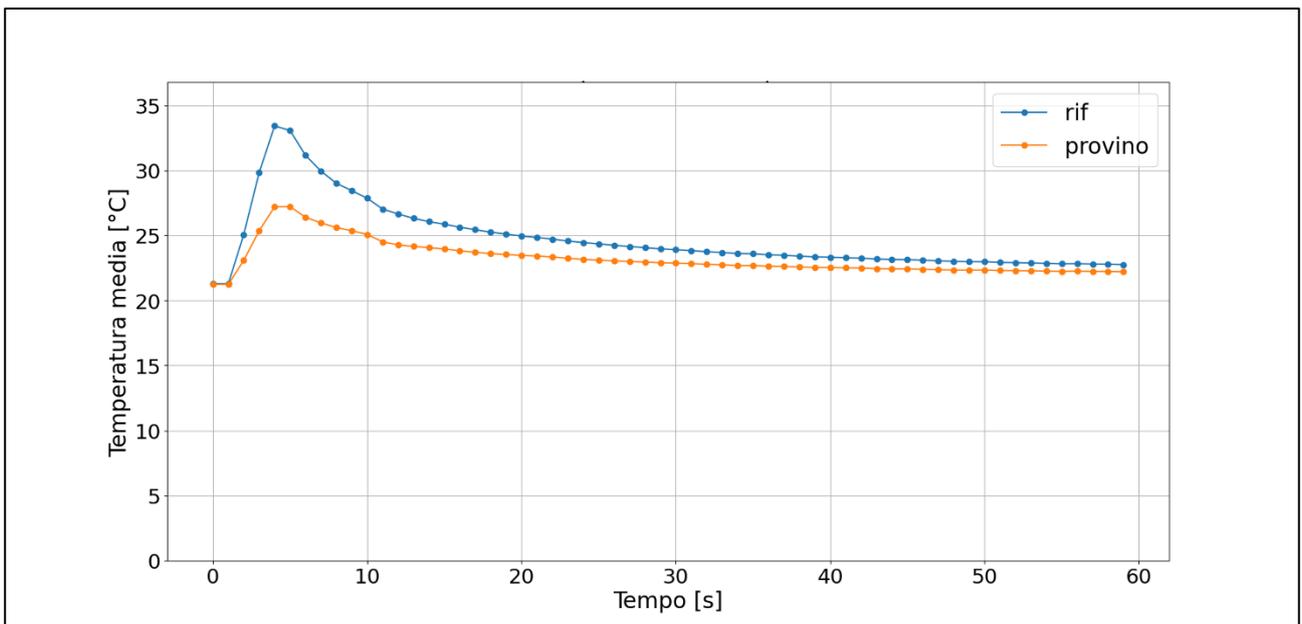


Figura 55 Andamento temporale delle temperature relativo a COM_22_T3, (cartone).

ϵ_{MEDIA}	0,87
ϵ_{MAX}	0,88
ϵ_{min}	0,86

Tabella 9 Valori di emissività [-] relativi a COM_22

Si apprezza una buona differenza di comportamento termico tra le due aree di lavoro. Il valore di emissività calcolato per il cartone, infatti, è superiore al valore fornito in Tabella 11 per $3 \mu\text{m}$, però ciò potrebbe essere dovuto al fatto che la termocamera opera in una banda spettrale differente, inoltre la superficie del campione non era pulita. La presenza di agenti come polveri, ecc. sul campione potrebbe aver influito sulla determinazione dell'emissività.

Di seguito sono riportati i risultati per ciascuna categoria di materiale. Il fronte e il retro delle piastrelle vengono considerati come due classi distinte di materiale, dato che le loro caratteristiche sono molto differenti. Questi risultati sono stati ottenuti calcolando l'emissività media, massima e minima e la deviazione standard, sulle varie prove realizzate sui provini che appartengono alle differenti categorie di materiale.

MATERIALE	ϵ_{MEDIA}	ϵ_{MAX}	ϵ_{min}	σ
Metallo	0,91	0,94	0,83	0,03
Plastica	0,88	0,97	0,71	0,05
Calcestruzzo	0,89	0,93	0,87	0,02
Ceramica e piastrelle	0,91	0,92	0,89	0,01
Retro piastrelle	0,87	0,88	0,86	0,01
Mattoni	0,87	0,92	0,85	0,02
Legno	0,90	0,94	0,86	0,03
Carta e cartone	0,87	0,89	0,84	0,01

Tabella 10 Risultati relativi alle diverse classi di materiale.

Di seguito si riportano alcuni dati da letteratura riguardo l'emissività di ciascun materiale, in modo da poter confrontare i risultati delle prove eseguite con tali valori, e fornirne un commento più ampio. Come dati di riferimento sono stati scelti valori di emissività provenienti da manuali tecnici [18]. Nella Tabella 11 i valori di riferimento per l'emissività dei materiali non sono sempre riferiti alla banda spettrale in cui lavora la termocamera, perciò si assumono questi ancora validi, dato che il valore dovrebbe rimanere invariato o cambiare di poco.

Materiale	Lunghezza d'onda λ [μm]	Temperatura T [$^{\circ}\text{C}$]	Emissività $\epsilon(\lambda, T)$ [-]
Acciaio ossidato	8-12	30	0,70-0,90
Acciaio laminato a freddo	8-12	30	0,70-0,90
Calcestruzzo	2-5	30-100	0,90
Calcestruzzo	2-5	20	0,94
Calcestruzzo	8-12	30	0,95
Carta	2-5	0-100	0,80-0,95
Carta	5	30	0,95
Carta	8-12	30	0,95
Carta bianca	2-5	17	0,68

Carta da parati	2-5	30	0,85-0,90
Carta di fibra porosa non trattata	2-5	-	0,85
Carta di fibra rigida non trattata	2-5	-	0,85
Carta plastificata	2-5	30	0,84-0,94
Carta plastificata bianca	2-5	-	0,84
Carta plastificata rossa	2-5	-	0,94
Cartone liscio	3	30	0,80
Ceramica	2-5	100	0,85-0,95
Ceramica	2-5	30	0,85-0,95
Ceramica	2-5	600	0,60-0,90
Legno	2-5	30	0,78
Legno compensato	2-5	17	0,83-0,98
Legno compensato, commerciale, finitura liscia, essiccato	5	36	0,82
Legno compensato non trattato	2-5	30	0,83
Legno da costruzione	5	30	0,87
Legno duro in senso longitudinale al grano	2-5	17	0,68-0,73
Legno duro in senso trasversale al grano	2-5	17	0,82
Legno grezzo	2-5	20	0,83
Legno in tavole	2-5	30	0,80-0,90
Legno naturale	8-12	30	0,90-0,95
Legno naturale	5	30	0,90-0,95
Legno ricostituito non trattato	2-5	30	0,90
Mattone rosso	2-5	20	0,95
Plastica acrilica chiara	5	36	0,94
Plastica bianca	2-5	30	0,84
Plastica nera	2-5	30	0,95
Plastica opaca	8-12	30	0,95
Plastica opaca	2-5	50	0,95
Plexiglas, Perspex	2-5	30	0,86
PVC	2-5	17	0,91-0,93
Vernice	8-12	30	0,90-0,95

Tabella 11 Valori di riferimento dell'emissività per alcune categorie di materiale [18].

Confrontando i dati ottenuti dalle prove di laboratorio, con i dati già esistenti si può notare che i risultati ottenuti sono concordi con i valori attesi, o comunque si discostano poco dal riferimento, ad esempio l'emissività calcolata per il calcestruzzo è più bassa rispetto al valore riportato in Tabella 11, ciò probabilmente è dovuto all'entità del riscaldamento. Dall'analisi dei risultati emergono alcune criticità. Osservando i valori ottenuti per la plastica si nota che l'emissività va da un minimo di 0,74 a un massimo di 0,97 e ciò è atteso in quanto polimeri diversi hanno comportamenti diversi. Interpretando questi ultimi risultati dal punto di vista dello scopo di questo studio, ovvero la caratterizzazione tramite la stima dell'emissività, ciò rappresenta una problematica in quanto il valore medio dell'emissività calcolato per la plastica non è attendibile per caratterizzare tutte le tipologie di polimeri esistenti, ma solo una parte. D'altra parte, però, questo evidenzia la sensibilità della tecnica verso diverse sottoclassi (es. diversi polimeri) di una stessa macro-classe (es. plastica).

Confrontando i risultati ottenuti per le varie classi di materiale emerge un'altra criticità, osservando i valori medi ottenuti per le singole classi e le emissività minime e massime calcolate, si nota che queste sono molto simili tra loro; perciò, se si dovesse identificare un materiale basandosi solo sulla stima della stessa, risulterebbe molto difficile se non impossibile distinguere una categoria di materiale dall'altra. A titolo di esempio, se si osservano i valori di emissività media, massima e minima calcolati per la carta e il cartone e per mattoni vediamo che questi sono coincidenti o quasi coincidenti. Un modello di riconoscimento basato esclusivamente sul confronto dei valori di emissività calcolati per i vari campioni non sarebbe in grado di discernere il cartone dai mattoni. Metallo e ceramica, hanno lo stesso valore di emissività media, quindi questa non rappresenta un parametro sufficiente per distinguerli, mentre i valori massimi e minimi sono leggermente differenti. In particolare, si nota che il metallo ha un intervallo di variazione dell'emissività più ampio rispetto a quello della ceramica, che è molto più ristretto; ciò è normale dato che la superficie del metallo può presentarsi in diversi stati. Si potrebbe pensare di discernere il metallo dalla ceramica basandosi sul confronto dei valori di emissività massima e minima calcolati. Dal calcolo dei valori di emissività è comunque possibile distinguere immediatamente alcuni tipi di materiale dagli altri, per esempio si può distinguere il metallo dalla plastica, dai mattoni, dal calcestruzzo, e dal cartone; lo stesso vale per la ceramica. Il legno, allo stesso modo, può essere facilmente distinto dalla plastica, dal cartone e dai mattoni, ma non è facilmente distinguibile dal calcestruzzo, dalla ceramica e dal metallo, dato che le differenze tra i valori non sono molto accentuate. Le piastrelle potrebbero essere classificate in maniera differente a seconda del lato analizzato. Se si analizza il lato smaltato la piastrella verrebbe classificata come ceramica, mentre se venisse analizzata dal lato grezzo verrebbe classificata come mattone; tuttavia, ciò non costituisce un problema dato che solitamente mattoni, ceramica e calcestruzzo vanno a costituire la frazione pietrosa dei CDW, da cui si ricavano gli agglomerati riciclati [4].

Si discutono ora i risultati ottenuti per i rifiuti misti, data la particolarità di questa tipologia di campione. Di seguito si riporta l'immagine nel visibile, il termogramma e l'istogramma della distribuzione in frequenza dei vari intervalli di emissività ottenuti per il provino.



Figura 56 SOR_M1 immagine RGB, (rifiuti misti).

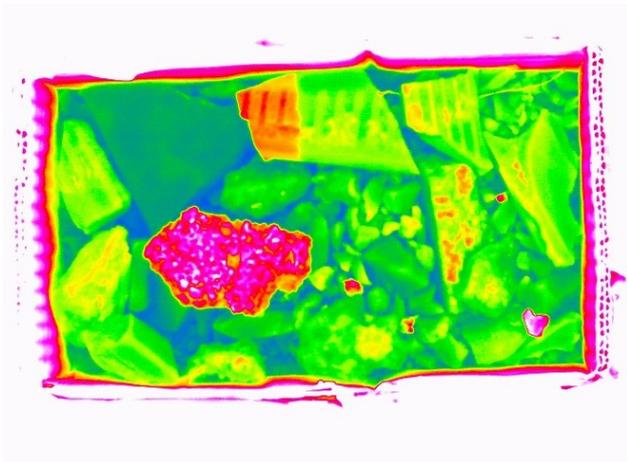


Figura 57 SOR_M1 termogramma, (rifiuti misti).

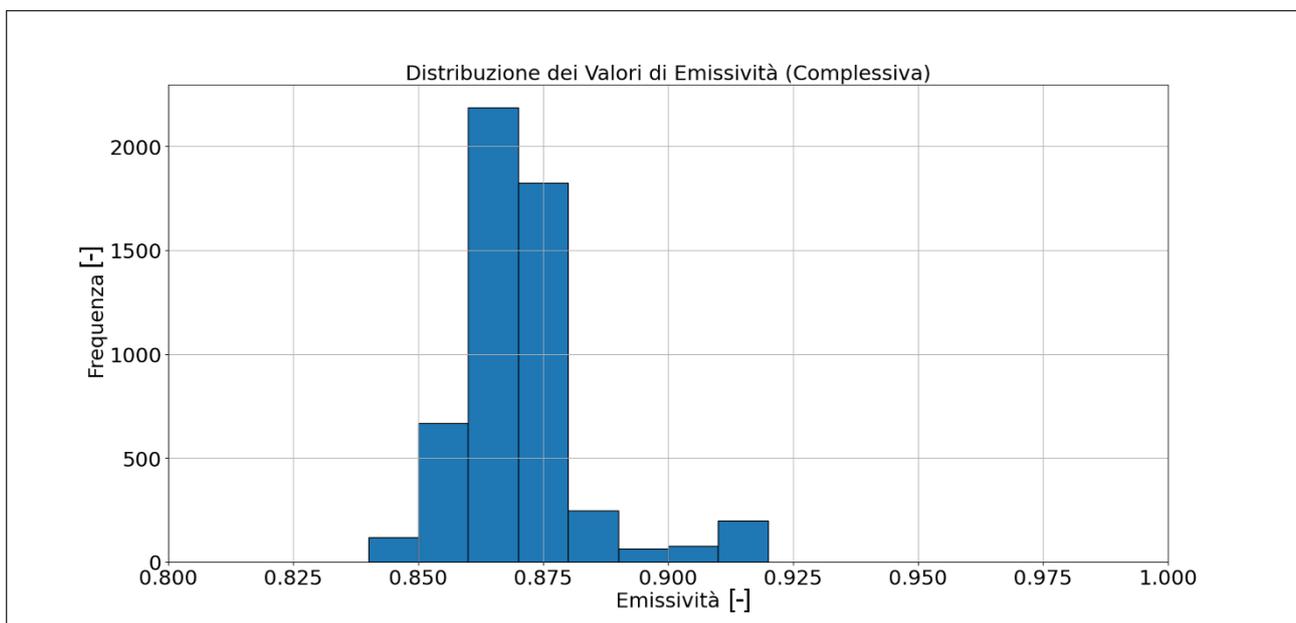


Figura 58 SOR_M1 istogramma complessivo della distribuzione in frequenza delle emissività, (rifiuti misti).

ϵ_{MEDIA}	0,87
ϵ_{MAX}	0,93
ϵ_{min}	0,84
σ	0,014

Tabella 12 Valori di emissività [-] e deviazione standard [-] calcolati per i rifiuti misti.

La distribuzione in frequenza delle emissività varia in funzione della composizione del campione analizzato. In questo caso i principali componenti dei rifiuti misti erano frammenti di mattone, calcestruzzo, ghiaia e sabbia, perciò la classe di emissività che si presenta con maggior frequenza è 0,86-0,87. Se la composizione del campione di rifiuti misti dovesse essere differente, e dovesse includere altri materiali la distribuzione cambierebbe.

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Valutare la possibilità di caratterizzare ogni tipologia di materiale che fa parte dei rifiuti da costruzione e demolizione tramite l'analisi termografica è essenziale per stabilire se in futuro sarà possibile costruire dei sistemi di sorting automatici basati su questa tecnica. L'attenta osservazione e interpretazione dei risultati ha portato alle seguenti conclusioni.

Dalle osservazioni effettuate sui risultati ottenuti per la categoria plastica, si può concludere che la tecnica di prova è molto sensibile alle differenze presenti tra le diverse tipologie di materiali che fanno parte di questa classe, e pertanto è impossibile fornire un unico valore rappresentativo dell'intera categoria, anche assumendo come valore indicativo l'emissività media ottenuta, diversi campioni sarebbero non considerati come plastica e quindi verrebbero classificati in maniera errata. Date le considerazioni fatte in precedenza sui risultati per ogni categoria di materiale, si può affermare che la caratterizzazione dei rifiuti da costruzione e demolizione, tramite la sola stima dell'emissività non risulta possibile, in quanto i valori misurati nelle prove sono troppo simili tra loro per costituire un discriminante efficace.

D'altra parte, vale la pena evidenziare l'importanza della caratterizzazione di questi materiali con la termografia, sia per avere un database utile alla comunità scientifica che per poter effettuare misure di temperatura su questi materiali sfruttando tecniche di misura senza contatto, dove conoscere con accuratezza l'emissività del materiale oggetto della misura è fondamentale.

La tecnica utilizzata impone un limite dato dal set-up, infatti, per stimare l'emissività occorre portare il materiale a una temperatura di almeno 8 °C al di sopra della temperatura ambiente, se si prende come riferimento la procedura elaborata in questa prova, oppure seguendo la norma [19], occorre riscaldare i campioni ad almeno 20 °C sopra la temperatura ambiente. Bisogna quindi disporre di un opportuno sistema di riscaldamento, e di opportuni accorgimenti in grado di evitare la presenza di eventuali riflessioni, provenienti da fonti di calore artificiali come le lampade, o fonti naturali come il sole. La tecnica risulta quindi facile da applicare in laboratorio, però può essere usata anche nelle realtà applicative come cantieri da costruzione e demolizione senza grosse difficoltà, utilizzando le dovute accortezze. Il set up proposto può essere uno spunto interessante per sviluppare impianti di differenziazione automatica dei rifiuti per centri di raccolta e smaltimento, dove i rifiuti vengono momentaneamente depositati e trattati prima di essere inviati alle loro destinazioni finali.

Si può concludere che per i motivi sopra citati, la stima dell'emissività non costituisce un metodo del tutto efficace per distinguere le varie categorie di materiali presenti nei rifiuti da costruzione e da demolizione, per tanto si dovranno integrare altre tecniche, che siano anche più versatili e di facile applicazione sul campo. In seguito, si riportano alcune idee per eventuali sviluppi futuri di questo progetto, ed eventuali tecniche che prevedono l'uso di più sensori.

In precedenza si è visto che per i provini di metallo il riscaldamento applicato era troppo basso per stimare accuratamente l'emissività. Nelle prove future si vuole riscaldare i campioni di metallo, calcestruzzo, e mattone, a più 20 °C rispetto la temperatura ambiente, per poi confrontare i risultati calcolati con quelli già ottenuti in questo studio, in modo da valutare l'influenza dell'entità del riscaldamento sull'emissività misurata.

Si vuole estendere le prove a gruppi molto più variegati di materiali, specialmente per classi come metalli e plastiche, in cui i valori di emissività variano moltissimo in base alla tipologia, allo stato

superficiale e ai trattamenti subiti. Avere una banca dati molto più ampia permetterebbe di sviluppare un software per l'identificazione dei vari materiali, utilizzando vari sistemi di rilevazione ottica.

Alcune termocamere permettono di scattare immagini anche nella banda del visibile esattamente come le telecamere industriali, oltre a fornire le immagini termiche. Ispirandosi a studi precedenti [13], si potrebbe elaborare un sistema basato sull'intelligenza artificiale, che esegue una prima suddivisione dei materiali basandosi sulle immagini visibili, per poi affinarla utilizzando i dati forniti dalle immagini termiche. Si potrebbe inserire un terzo controllo, in serie ai primi due, usando ad esempio telecamere iperspettrali. Da esperienze precedenti si vede che l'uso di più controlli in cascata permette di migliorare di volta in volta la selezione dei materiali; quindi, l'approccio proposto risulterebbe di sicuro vantaggioso e più completo.

3. BIBLIOGRAFIA

- [1] 2011. [Online]. Available: https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste_en .
- [2] *CEN/TC 104/SC 1/TG 19 use of aggregates in concrete. Sixth draft text for the EN standard.*
- [3] R. Silva, J. De Brito e R. Dhir, «Properties and composition of aggregates recycled from construction and demolition waste suitable for concrete production.,» 2014.
- [4] I. Vegas, K. Broos, O. Lambertz e A. Lisbona, «Improving the quality of mixed aggregates recycled from construction and demolition waste using near-infrared sorting technology.,» 2015.
- [5] S. Serranti, R. Palmieri e G. Bonifazi, «Hyperspectral imaging applied to demolition waste recycling: an innovative approach for product quality control.,» 2015.
- [6] G. Bonifazi, G. Capobianco e S. Serranti, «Hyperspectral imaging and hierarchical PLS-DA applied to asbestos recognition in construction and demolition waste.,» 2019.
- [7] Z. Wang, W. Li e X. Yang, «Vision-based robotic system for on-site construction and demolition waste sorting and recycling,» 2020.
- [8] S. Zhang, Y. Chen, Z. Yang e H. Gong, «Computer Vision Based Two-Stage Waste Recognition-Retrieval Algorithm for Waste Classification,» 2021.
- [9] W. Lu, J. Chen e F. Xue, «Use of computer vision to recognize the composition of construction waste mixtures. Construction waste mixtures: a semantic segmentation approach.,» 2021.
- [10] F. Konstantinidis, S. Sifnaios, G. Tsimiklis, S. Mouroutsos, A. Amditis e A. Gasteratos, «Multi-sensor cyber-physical sorting system (CPSS) based on Industry 4.0 principles: A multi-functional approach,» 2023.
- [11] S. Lotfi, F. Di Maio, H. Xiaa, S. Serranti, R. Palmieri e G. Bonifazi, «Assessment of the contaminants level in recycled aggregates and alternative new technologies for contaminants recognition and removal,» 2015.
- [12] G. Bonifazi, O. Trotta, G. Capobianco e S. Serranti , «Characterization of post-earthquake construction and demolition wastes by Hyperspectral imaging,» 2021.
- [13] M. Nyumura e Y. Bao, «Selection of construction waste using sensor fusion,» 2019.
- [14] S. Gundupalli, S. Hait e A. Thakur, «Classification of metallic and non-metallic fractions of e-waste using thermal imaging-based technique.,» 2018.
- [15] S. Gundupalli, S. Hait e A. Thakur, «Multi-material classification of dry recyclables from municipal solid waste based on thermal imaging.,» 2017.
- [16] H. Schmitz, N. Shpakova, A. Keller e U. Netzelmann, «Classification of black plastic using active thermography,» 2024.

- [17] H. Bai, T. Bhattacharjee, H. Chen, A. Kapusta e C. Kemp, «Towards Material Classification of Scenes Using Active Thermography,» 2018.
- [18] G. Fabbri e R. Ricca, La termografia vol.1 terza edizione, 2009.
- [19] *ISO 18434-1*, 2011.
- [20] «Sito dell'azienda produttrice della vernice HiE Coat 840-C,» [Online]. Available: www.aremco.com.