



Università Politecnica della Marche
Facoltà di Ingegneria

Corso di laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**“Valutazione dell’emissività di vernici alto emissive
per applicazioni ad alte temperature”**

**“Evaluation of high-emissivity paints for high
temperature applications”**

Relatore:
Prof. Gian Marco Revel

Tesi di Laurea di:
Lorenzo Mira

Correlatori:
Dot.ssa Rachele Napolitano

Dott. Giuseppe Pandarese

A.A. 2019/2020

INDICE

1. INTRODUZIONE	5
2. PROPRIETÀ TERMICHE DEI MATERIALI	6
2.1 Fondamenti di trasmissione del calore.....	6
2.2 La trasmissione del calore per irraggiamento	7
2.3 Radiazione termica.....	8
2.3.1 La Radiazione del corpo nero.....	9
2.3.2 Emettitori diversi dai corpi neri.....	11
2.4 Metodi di misura della temperatura	14
2.4.1 Sensori a contatto	14
2.4.1.1 Termoresistori e termistori.....	15
2.4.1.2 Termocoppie	20
2.4.2 Sensori non a contatto	23
2.4.2.1 Pirometri	23
2.4.2.2 Termocamere IR	25
3. METODI PER LA MISURAZIONE DELL'EMISSIVITÀ	30
3.1 Metodi indiretti.....	30
3.2 Metodi diretti.....	32
3.3 Caratterizzazione dell'emissività di alcuni materiali ad alte temperature	34
3.3.1 Materiali basso-emissivi.....	35
3.3.2 Materiali alto-emissivi.....	36
3.3.3 Problematiche di acquisizione ad elevate temperature.....	37
4. MATERIALI E METODI DI MISURA	39
4.1 Set-up sperimentale.....	39
4.2 Acquisizione ed Elaborazione delle immagini IR.....	43
5. RISULTATI	46
6. CONCLUSIONI	50
7. BIBLIOGRAFIA	53
8. FIGURE DI RIFERIMENTO	55

1. INTRODUZIONE

Nell'industria metallurgica e delle ceramiche si è sempre alla ricerca di nuovi sistemi di produzione più efficienti, ecco perché nell'ultimo periodo si è pensato al forno a microonde, per via del suo minor fabbisogno energetico, nel portare i materiali (ceramici o metallici) ad elevate temperature in un breve lasso di tempo.

Per poter valutare l'efficacia e l'affidabilità del forno a microonde, date le elevate temperature si utilizzano sistemi non a contatto (ad esempio termocamere o pirometri che sono meno invasivi e meno soggetti al surriscaldamento) per stimare la temperatura raggiunta all'interno del forno e sul materiale in cottura.

Nei forni a microonde si utilizza un tubo ceramico per trasportare il materiale in cottura in quanto resiste alle alte temperature. Tale tubo viene rivestito con una vernice alto emissiva per fornire una lettura più accurata della temperatura da parte dei trasduttori che lavorano usando l'irraggiamento.

L'obiettivo del tirocinio è stato quello di caratterizzare il comportamento emissivo di diverse vernici commerciali, classificate come alto-emissive, alle alte temperature e verificare quale sia la migliore nel rapporto prezzo/performance.

La tesi è articolata in due parti: nella prima (Capitoli 2 e 3) è stata condotta un'indagine della letteratura scientifica sulle proprietà termiche dei materiali, sui vari metodi e tecnologie di misura utilizzati ad oggi per la stima dell'emissività e sulle problematiche relative alla sua caratterizzazione alle elevate temperature. Questa prima parte risulta essere propedeutica alla seconda (Capitoli 4 e 5), in cui è stato possibile selezionare gli strumenti e scegliere il metodo di misura più adatto per la realizzazione di un set-up in laboratorio. Il set-up proposto, ha previsto la realizzazione di un provino con le diverse vernici alto-emissive da testare alle alte temperature raggiunte con un becco di Bunsen e, tramite un codice elaborato con il software ©Matlab, i dati raccolti sono stati processati ottenendo dei grafici di emissività in funzione della temperatura dei vari materiali. Infine, le conclusioni (Capitolo 6) riassumono i risultati ottenuti da questa attività.

2 PROPRIETÀ TERMICHE DEI MATERIALI

Le proprietà termiche di un materiale sono correlate alla conduttività del calore, in altre parole, si manifestano quando il calore lo attraversa. Da tali proprietà dipende anche la reazione del materiale quando questo è soggetto a fluttuazioni di calore (calore eccessivo o calore molto basso, per esempio).

2.1 Fondamenti di trasmissione del calore

La trasmissione di calore tra due corpi avviene spontaneamente quando si ha una differenza di temperatura tra loro, con passaggio di calore dall'oggetto più caldo a quello più freddo fino al raggiungimento di un equilibrio termico, come asserisce il secondo principio della termodinamica: "l'entropia di un sistema isolato lontano dall'equilibrio termico tende a salire nel tempo, finché l'equilibrio non è raggiunto" [1]. Il corpo caldo trasmette a quello freddo parte della sua energia termica aumentandone l'agitazione molecolare: la differenza di temperatura tra i due corpi rappresenta la causa del trasferimento di calore.

Le modalità di trasmissione sono:

- Conduzione
- Convezione
- Irraggiamento

Conduzione

La conduzione avviene quando due corpi a differenti temperature si trovano a contatto diretto; il corpo più caldo riscalda il corpo più freddo mediante cessione di parte della propria energia termica. L'energia termica del corpo più caldo, che a livello microscopico s'identifica in energia cinetica vibrazionale molecolare, è trasmessa al corpo più freddo con una velocità direttamente proporzionale alla conducibilità termica del materiale (k). Quindi l'energia trasmessa per conduzione da un corpo più caldo a uno più freddo, potrà essere calcolata mediante la legge di Fourier [2] dalla seguente equazione:

$$q = (k/s) A (T_1 - T_2) \quad (2.1)$$

Con:

q : Energia trasmessa [W]

k : Conducibilità termica del materiale in cui avviene il passaggio di calore [W/mK]

s : Spessore della sezione attraversata dal calore [m]

A : Area della sezione considerata [m²]

T_1 : Temperatura del corpo più caldo [K o °C]

T_2 : Temperatura del corpo più freddo [K o °C]

Convezione

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

Questo secondo tipo di trasmissione di calore è descritto dalla legge di Newton [2]. Il calore ceduto per convezione è descritto dall'equazione di seguito:

$$q_c = h A_s (T_1 - T_f) \quad (2.2)$$

Con:

q_c : Calore ceduto per convezione [W]

A_s : Area della superficie del corpo più caldo [m²]

h : Coefficiente di convezione termica [W/m²K]

T_1 : Temperatura della superficie del corpo più caldo [K o °C]

T_f : Temperatura del fluido termovettore [K o °C]

Irraggiamento:

Rappresenta la radiazione che proviene dall'oggetto preso in considerazione verso l'ambiente o verso un altro corpo. La teoria dell'irraggiamento molto importante nelle indagini termografiche verrà approfondita nel paragrafo successivo.

2.2 La trasmissione del calore per irraggiamento

Con trasmissione di calore per irraggiamento si intende il trasporto di energia sotto forma di calore tramite onde elettromagnetiche.

Perché avvenga la trasmissione del calore tra due corpi non è necessaria la presenza di un mezzo trasmissivo interposto, come avveniva per la conduzione o la convezione, ma la si può ottenere anche attraverso il vuoto.

Il fondamento teorico dell'irraggiamento si basa sul concetto di onda elettromagnetica o radiazione elettromagnetica che rappresenta l'energia emessa dalla materia in conseguenza dei cambiamenti nelle configurazioni elettroniche di molecole o atomi degli elementi. Le onde elettromagnetiche viaggiano alla velocità della luce e sono caratterizzate da due parametri: la frequenza f e la lunghezza d'onda λ , legate dalla relazione [3]:

$$\lambda = c / f \quad (2.3)$$

Con $c = c_0/n$, dove n è l'indice di rifrazione del mezzo e c_0 è la velocità della luce nel vuoto, pari a 2.998×10^8 m/s.
 n è circa uguale a 1 per l'aria e 1.5 per l'acqua ed il vetro.

La frequenza di un'onda elettromagnetica (f) dipende dalla sola sorgente ed è indipendente dal mezzo attraverso cui l'onda si propaga. La frequenza, che corrisponde al numero di oscillazioni per secondo, può variare in funzione della sorgente. La radiazione elettromagnetica viene considerata come propagazione di una serie di pacchetti discreti detti fotoni o quanti, dove [4] :

$$E = hf = hc / \lambda \quad (2.4)$$

Con $h = 6.625 \times 10^{-34}$ J·s (costante di Plank).

Questa relazione ci permette di concludere che, essendo h e c costanti, l'energia di ogni fotone è inversamente proporzionale alla sua lunghezza d'onda, e che quindi la radiazione di più piccola lunghezza d'onda possiede la maggiore energia. Le radiazioni elettromagnetiche coprono un campo esteso di lunghezze d'onda, variabile da meno di 10^{-10} μm per i raggi cosmici fino a più di 10^{10} μm per le onde elettriche di potenza.

2.3 Radiazione termica

La radiazione elettromagnetica che si identifica nella trasmissione di calore è la parte dello spettro elettromagnetico che va da 10^{-1} a 10^2 μm , includendo la radiazione infrarossa (IR) e parte della radiazione ultravioletta (UV). Poiché la temperatura è una misura dell'intensità di questi processi a livello microscopico, all'aumentare della temperatura aumenta l'emissione di radiazione termica, che è continuamente emessa da tutta la materia che si trovi a temperatura superiore allo zero assoluto

Nello studio della trasmissione del calore, quindi, si considera solamente la radiazione termica che è anche detta più semplicemente irraggiamento. Poiché gli elettroni, gli atomi e le molecole dei solidi, liquidi e gas al di sopra dello zero assoluto sono costantemente in movimento l'irraggiamento è un fenomeno volumetrico anche se per i materiali opachi (metalli, legno, mattoni, ecc.) è considerato un fenomeno superficiale.

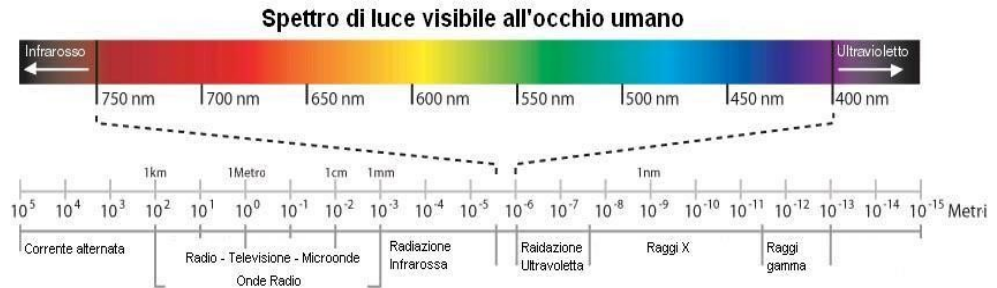


Figura 1. Spettro visibile

2.3.1 La Radiazione del corpo nero

L'emissione della radiazione e il modo di reagire del corpo sono proprietà che dipendono dai trattamenti superficiali dei corpi. Per cercare di semplificare il problema si è introdotta una semplificazione attraverso il concetto di corpo nero. Si definisce un corpo nero ideale, o semplicemente **corpo nero**, un corpo la cui funzione è l'essere usato come riferimento rispetto alla radiazione incidente indipendentemente da direzione e lunghezza d'onda. Questo perché il corpo nero è un perfetto emettitore e assorbitore di radiazioni cioè è in grado di emettere o assorbire la massima radiazione per ogni temperatura e lunghezza d'onda indipendentemente dalla direzione.

La radiazione emessa da un corpo nero è descritta attraverso tre espressioni:

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

La prima, la legge di Planck (Max Planck 1858-1947) descrive la distribuzione spettrale della radiazione emessa da un corpo nero [5] :

$$W_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \times 10^{-6} \text{ [Watt/m}^2, \mu\text{m]} \quad (2.5)$$

Con:

$W_{\lambda b}$: Emittanza spettrale energetica del corpo nero alla lunghezza d'onda λ

C: Velocità della luce = 3×10^8 m/s

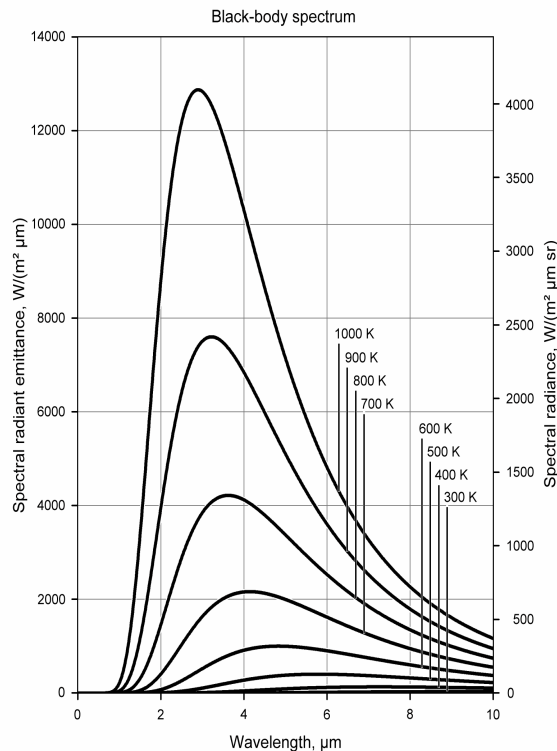
H: Costante di Planck = $6,6 \times 10^{-34}$ Joule sec

K: Costante di Boltzmann = $1,4 \times 10^{-23}$ Joule / Kelvin

T: Temperatura assoluta (Kelvin) di un corpo nero

Λ : Lunghezze d'onda μm

Tale legge, rappresentata graficamente alle diverse temperature, genera una famiglia di curve (Fig. 2) dalle quali si evince che:



- La radiazione emessa è una funzione continua della lunghezza d'onda che all'aumentare di λ aumenta sino a raggiungere un picco e poi decresce;
- Fissata λ la radiazione emessa aumenta all'aumentare di T ;
- All'aumentare di T le curve diventano più ripide e si spostano a sinistra nella zona delle lunghezze d'onda più corte, per cui a T elevate corrisponde una frazione maggiore di radiazione emessa a lunghezza d'onda più corte.

Figura 2. Emittanza energetica spettrale di un corpo nero

Differenziandosi dalla formula di Planck relativamente a λ , e trovando il massimo, si ottiene [5]:

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} [\mu m] \quad (2.6)$$

Nota come formula di Wien la relazione esprime il concetto che più un oggetto è caldo e minore è la lunghezza d'onda a cui emetterà radiazione. Questo fenomeno si può osservare riscaldando un corpo e notando che i colori variano dal rosso all'arancione o al giallo con l'aumentare della temperatura.

Integrando la formula di Planck tra gli estremi $\lambda=0$ a $\lambda=\infty$, otteniamo l'emittanza radiante totale (W_b) di un corpo nero [5]:

$$W_b = \sigma T^4 [Watt/m^2] \quad (2.7)$$

Con:

σ : Costante di Stefan-Boltzmann = $5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

Si è così ottenuta *la legge di Stephan – Boltzmann* dalla quale si evince che la quantità totale di energia emessa da un corpo nero è proporzionale alla temperatura assoluta elevata alla quarta potenza.

2.3.2 Emettitori diversi dai corpi neri

Nella realtà i corpi emetteranno sempre meno energia di un corpo nero alla stessa temperatura e rifletteranno una parte dell'energia che incide su di essi. Per poter caratterizzare questo comportamento, che nel caso più generale, varia al variare della lunghezza d'onda della radiazione incidente si utilizzano le proprietà radiative, definite proprio assumendo come riferimento il comportamento del corpo nero.

I fenomeni che inducono un oggetto reale a non comportarsi come un corpo nero sono tre: una frazione della radiazione incidente α può essere assorbita, una frazione ρ può essere riflessa, mentre un'altra τ può essere trasmessa. Poiché tali fattori dipendono più o meno della lunghezza d'onda, l'indice λ viene utilizzato per stabilire la dipendenza spettrale delle loro definizioni.

Pertanto:

- Coefficiente di assorbimento spettrale $\alpha\lambda = E_a/E$;
- Coefficiente di riflessione spettrale $\rho\lambda = E_r/E$;
- Coefficiente di trasmissione spettrale $\tau\lambda = E_t/E$.

Con: E_a = flusso energetico spettrale assorbito, E_r = flusso energetico spettrale riflesso, E_t = flusso energetico spettrale trasmesso.

La loro somma è sempre unitaria $\alpha\lambda + \rho\lambda + \tau\lambda = 1$; la maggior parte dei corpi, eccetto quelli traslucidi o trasparenti, possono essere considerati corpi opachi, ovvero non trasmettono radiazioni ($\tau\lambda=0$), quindi si ha che $\alpha\lambda + \rho\lambda=1$ [5].

Un altro fattore importante è l'**emissività** di una superficie, definita come il rapporto tra la radiazione emessa dalla superficie e la radiazione emessa dal corpo nero alla stessa temperatura. L'emissività di una superficie si indica con ε , varia tra zero e uno ($0 \leq \varepsilon \leq 1$) ed è una misura di quanto una superficie reale approssima un corpo nero per il quale $\varepsilon=1$.

L'emissività di una superficie reale non è costante ma varia con la temperatura della superficie, con la lunghezza d'onda e con la direzione della radiazione

emessa. In pratica l'effetto della direzione si trascura effettuando una media su tutte le direzioni e denotando conseguentemente l'emissività come emisferica. La dipendenza dalla lunghezza d'onda può essere invece significativa e perciò si impiega **l'emissività emisferica monocromatica** e si indica con ε_λ [5]:

$$\varepsilon_\lambda(\lambda, T) = \frac{W_\lambda(\lambda, T)}{W_{\lambda b}(\lambda, T)} \quad (2.8)$$

L'emissività emisferica totale ε è invece mediata su tutte le direzioni e su tutte le lunghezze d'onda e si esprime con la relazione:

$$\varepsilon(T) = \frac{W(T)}{W_b(T)} = \frac{W(T)}{\sigma T^4} \quad (2.9)$$

Quest'ultimo valore viene utilizzato nella pratica per caratterizzare le proprietà emissive delle superfici sebbene queste dipendano sia dalla direzione, sia dalla lunghezza d'onda.

In generale possiamo distinguere tre tipi di sorgenti di radiazione:

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

La **legge di Kirchhoff** mi permette di effettuare una semplificazione nello studio dei corpi grigi affermando che l'emissività emisferica totale di una superficie a temperatura T eguaglia il coefficiente di assorbimento emisferico globale per radiazione proveniente da un corpo nero alla medesima temperatura.

Si consideri un piccolo corpo di area superficiale A , emissività ε e coefficiente di assorbimento α alla temperatura T , contenuto in una grande cavità isoterma alla stessa temperatura, come mostrato in figura 3.

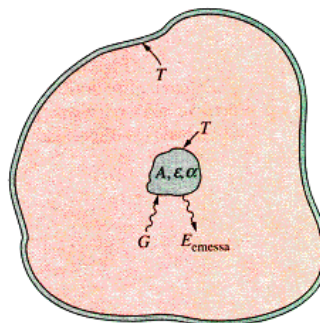


Figura 3. Corpo in cavità isoterma

Una cavità isoterma costituisce un corpo nero indipendente delle proprietà radiative della sua superficie interna. Supponendo inoltre che la il corpo nella cavità sia tanto piccolo da non influenzare la natura del corpo nero, la radiazione incidente sulla superficie del corpo all'interno della cavità è uguale alla radiazione emessa dalla cavità alla temperatura T.

$$G = \sigma T^4 \quad (2.10)$$

Di questa, la parte assorbita dal corpo sarà:

$$G_{ass} = \alpha G = \alpha \sigma T^4 \quad (2.11)$$

La radiazione emessa dal corpo con emissività ε sarà invece:

$$W_{emessa} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.12)$$

In condizioni di equilibrio termico la potenza assorbita dal corpo dovrà eguagliare quella irradiata, pertanto [6]:

$$A \varepsilon \sigma T^4 = A \alpha \sigma T^4 \rightarrow \varepsilon(T) = \alpha(T) \quad (2.13)$$

Di conseguenza per un corpo opaco, poiché $\alpha\lambda + \rho\lambda = 1$, otteniamo $\varepsilon\lambda + \rho\lambda = 1$. Per materiali estremamente lucidi $\varepsilon\lambda$ tende a zero ($\varepsilon\lambda \rightarrow 0$), mentre per materiali perfettamente riflettenti avremo $\varepsilon\lambda = 0$ e quindi $\rho\lambda = 1$ (es.: specchio)

La legge di Stephan-Boltzmann per un corpo nero diventa, invece, per un corpo grigio [5]:

$$W = \varepsilon \sigma T^4 \text{ [Watt/m}^2\text{]} \quad (2.14)$$

L'espressione dimostra che il potere emissivo totale di un corpo grigio sia uguale a quello di un corpo nero alla stessa temperatura moltiplicato per il valore dell'emissività ε del corpo grigio.

Nella tabella sotto stante viene riportato il valore di ε di alcuni materiali di utilizzo comune:

Materiali	Coeff. di assorbim. solare α_s	Emissività ϵ a 300 K
Alluminio		
Lucido	0.09	0.03
Anodizzato	0.14	0.84
Rivestito al quarzo	0.11	0.37
In foglio	0.15	0.05
Mattone, rosso	0.63	0.93
Calcestruzzo	0.60	0.88
Foglio di metallo galvanizzato		
Pulito, nuovo	0.65	0.13
Ossidato, atmosferico	0.80	0.28
Vetro, spessore 3.2 mm		
In polvere o temprato		
A basso tenore di ferro		
Marmo, leggermente non bianco (non riflettivo)	0.40	0.88
Metallo, piastra		
Solfuro nero	0.92	0.10
Ossido di cobalto nero	0.93	0.30
Ossido di nichel nero	0.92	0.08
Cromo nero	0.87	0.09
Vernici		
Nera	0.98	0.98
Bianca, acrilica	0.26	0.90
Bianca, ossido di zinco	0.16	0.93
Carta bianca	0.27	0.83
Plexiglas, spessore 3.2 mm		
Tegole di porcellana, bianche	0.26	0.85
Tegole per tetto, rosso vivo		
Superficie secca	0.65	0.85
Superficie umida	0.88	0.91
Sabbia, secca		
Bianco brillante	0.52	0.82
Rosso opaco	0.73	0.86
Neve		
In particelle fini, fresca	0.13	0.82
Granuli di ghiaccio	0.33	0.89
Acciaio		
Finito a specchio	0.41	0.05
Molto arrugginito	0.89	0.92
Pietra (leggermente rosa)	0.65	0.87
Legno	0.59	0.90

Tabella 1. Valori di emissività

2.4 Metodi di misura della temperatura

Sono stati sviluppati molti metodi per la misurazione della temperatura. La maggior parte di questi si basano sulla misurazione di una delle proprietà fisiche di un dato materiale, che varia in funzione della temperatura. È possibile effettuare una prima classificazione tra sensori a contatto e non a contatto tenendo a mente che il modo di misurare la temperatura (con o senza contatto) si riflette sulla struttura del sensore.

2.4.1 Sensori a contatto

Nel caso di misura a contatto, si rilevano sia le variazioni di resistenza elettrica di materiali conduttori e semiconduttori sia fenomeni termoelettrici. Nel caso di misurazioni senza contatto si ricorre, invece, alla misura dell'energia radiante.

Dobbiamo tenere a mente che la misura della temperatura comporta sempre un trasferimento di calore dal misurando al sensore fenomeno che ha molta rilevanza nei sensori a contatto dove il trasferimento avviene per conduzione. Infatti, l'inserimento del sensore comporterà sempre una perturbazione delle condizioni di misura iniziali, pertanto, ad un sensore che opera per conduzione termica, saranno richieste una elevata conducibilità termica (elevata velocità di trasferimento di calore) ed un basso calore specifico (limitato assorbimento di calore).

2.4.1.1 Termoresistori e termistori

La resistenza elettrica dei vari materiali cambia in funzione della temperatura, ad esempio in un conduttore o semiconduttore l'aumento della temperatura provoca l'aumento dell'agitazione termica degli atomi, fenomeno che ostacola il movimento degli elettroni di conduzione. Ma la temperatura influenza anche le dimensioni geometriche del materiale in esame, provocando quindi un'ulteriore variazione di resistenza così quantificata [7]:

$$R = \frac{\rho L}{S} [\Omega] \quad (2.15)$$

dove ρ è la resistività elettrica del materiale, L è la lunghezza del conduttore e S la sua sezione.

Gli RTD o termoresistori che hanno come elemento sensibile un filo metallico (conduttore), basano il proprio funzionamento sulla dipendenza della resistività dai fattori sopra indicati come risulta anche dalla seguente relazione [8]:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \dots + \alpha_n T^n) \quad (2.16)$$

dove R_0 è la resistenza del RTD alla temperatura T_0 , che spesso si suppone pari a 0°C , e T è lo scostamento della temperatura rispetto al riferimento T_0 . I parametri $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$ assumono valori che dipendono dal materiale con cui il termo resistore viene realizzato.

Nelle applicazioni pratiche dove non vi è richiesta un'elevata accuratezza e il campo di temperatura è abbastanza limitato, si può arrestare lo sviluppo al primo termine e considerare il comportamento del RTD lineare con la temperatura. In questo caso si ha [9]:

$$R(T) = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (2.17)$$

Nei limiti entro i quali tale approssimazione è accettabile, il coefficiente di temperatura è quindi circa pari ad α . Il valore di α , espresso in K^{-1} , dipende dal materiale [10]:

$$\alpha = \frac{R_{100^{\circ}C} - R_{0^{\circ}C}}{100 \cdot R_{0^{\circ}C}} \quad (2.18)$$

Teoricamente tutti i metalli potrebbero essere impiegati per la realizzazione dei sensori, tuttavia nella pratica le termoresistenze sono costruite esclusivamente con filo di platino, rame e nichel. Dei tre il più usato è il platino che offre una maggior linearità in un vasto intervallo di temperatura (vedi Figura 4), oltre ad una maggiore purezza ($\alpha = 3.58 \times 10^{-3}$ per $^{\circ}C$).

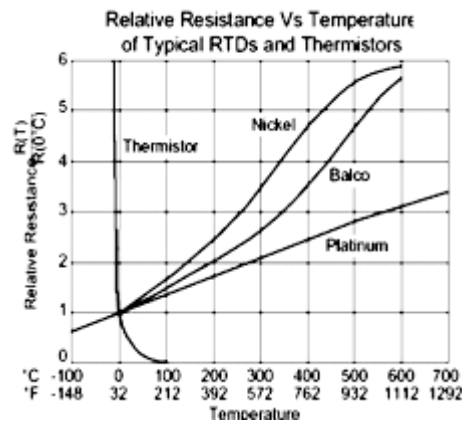


Figura 4. Grafico Resistenza temperatura

Nello specifico sono molto utilizzati i sensori RTD al platino aventi la resistenza nominale alla temperatura di riferimento pari a 100 Ω (da 25 a 200 Ω), convenzionalmente indicati con la sigla Pt100. Nel caso del platino la relazione tra resistenza e temperatura viene descritta dall'equazione di Callendar-Van Dusen (che viene corretta in base alla IPTS-68) [10]:

Per $T > 0^{\circ}C$:

$$R(T) = R_0(1 + AT + BT^2) \quad (2.19)$$

Per $T < 0^{\circ}C$:

$$R(T) = R_0(1 + AT + BT^2 + C(t - 100)T^3) \quad (2.20)$$

Con:

T: temperatura in °C

R(T): resistenza alla temperatura t

R_0 : resistenza a 0°C

A, B e C: Costanti che derivano da parametri determinati sperimentalmente quali α , β e δ , utilizzando misurazioni di resistenza effettuate a 0 ° C, 100 ° C e 260 ° C.

Generalmente negli RTD la resistenza sensibile alle variazioni di temperatura viene applicata su un supporto sotto forma di avvolgimento di misura che può essere fuso in vetro o incorporato in una massa di ceramica. Resistori così costruiti sono fragili e per proteggerli dalle sollecitazioni meccaniche o da agenti corrosivi vengono installati in appositi tubi di protezione. Ne consegue che per avere una buona velocità di risposta è necessario che il bulbo e la termoresistenza abbiano piccole dimensioni e buona trasmissione del calore (piccola inerzia termica) esigenza che non si concilia con la necessità di avere elevata sensibilità. Ulteriore problema è la bassa resistenza degli RTD, dei sensori passivi, perciò onde evitare che il valore V(T) sia determinato dalla resistenza dei fili interconnessi si utilizza per collegare il sensore alla corrente di eccitazione un circuito a ponte.

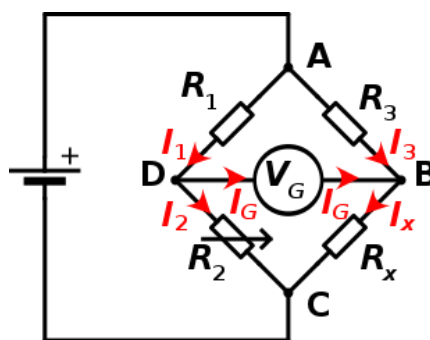


Figura 5. Ponte di Wheatstone

Come scritto in precedenza l'elemento sensibile può essere anche un semiconduttore ma in tal caso il sensore prende il nome di Termistore. Esistono due modi sostanzialmente diversi di realizzare tali sensori che consistono nell'utilizzare come materiale sensibile il silicio oppure miscele sinterizzate a caldo di ossido di nichel, biossido di manganese e sesquiossido di ferro (drogatura). Il principale vantaggio presentato dai termistori nella misura della temperatura è la loro notevole sensibilità alla quale si aggiungono ulteriori vantaggi: la dimensione ridotta che garantisce una risposta rapida, e l'elevata

resistenza del componente che evita l'utilizzo di circuiti a ponte. Ma all'elevata resistenza corrisponde una linearità veramente bassa, un range del sensore limitato (massimo 200° C) e una maggiore fragilità.

I termistori possono essere divisi in due categorie, basate sull'andamento della resistenza all'aumentare della temperatura: NTC (Negative Temperature Coefficient) e PTC (Positive Temperature Coefficient), come mostrato in figura 6:

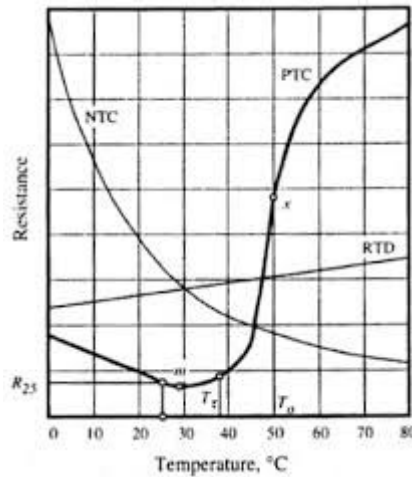


Figura 6. Comportamento Termistori

I termistori NTC hanno un coefficiente di temperatura negativo: ad un aumento di temperatura corrisponde una diminuzione di resistenza. Tale fenomeno si verifica nei semiconduttori puri e l'equazione di Steinhart-Hart lo descrive [8]:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C (\ln R)^3 \quad (2.21)$$

Con:

T: Temperatura (in kelvin);

R: Resistenza (in ohm);

A, B, C: Coefficienti di Steinhart-Hart che variano secondo il tipo e modello del termistore e il range di temperatura scelto.

In campo pratico per semplicità se trascura il termine di terzo grado [8]:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R \quad (2.22)$$

che risulta rispetto a R diventa:

$$R = R_0 e^{\beta(1/T - 1/T_0)} \quad (2.23)$$

Con:

T: Temperatura in kelvin;

T₀: Temperatura di riferimento (di solito 25°C=298,15°K);

R: Resistenza alla temperatura T;

R₀: Resistenza di riferimento (resistenza alla temperatura di riferimento);

β: è costante in prima approssimazione detta anche temperatura caratteristica (alcuni costruttori forniscono il suo valore in °K).

Per gli NTC esiste, ed è rilevante, il problema dell'auto riscaldamento dell'elemento per effetto della corrente di alimentazione. A tal proposito i costruttori forniscono un parametro che, indicato con la lettera δ, viene detto coefficiente di dissipazione e viene misurato in W/°K.

I termistori PTC hanno, per basse temperature, un coefficiente negativo o nullo in modo simile agli NTC ma in un intervallo di temperature superiore ad una certa soglia T_r il coefficiente diventa positivo ed il modulo molto più alto, per poi diminuire e ridiventare negativo.

La relazione che lega resistenza e temperatura in un termistore PTC dipende da molteplici fattori:

- coefficiente di temperatura
- R₂₅ resistenza a temperatura ambiente (25°C)
- R_m valore minimo di resistenza
- T_T temperatura di switch in corrispondenza della quale la resistenza inizia ad aumentare rapidamente.

I termistori sia NTC che PTC sono realizzati con componenti ceramici costituiti da una struttura policristallina ottenuta per sinterizzazione di ossidi metallici e non, opportunamente miscelati. I dispositivi NTC sono ottenuti dalla sinterizzazione di ossidi metallici drogati come Mn₂O, NiO, Co₂O₃, Cu₂O, Fe₂O₃ e TiO₂, mentre i dispositivi PTC sono realizzati con materiale ceramico a base di titanio e bario con aggiunte di piombo o zirconio, in commercio esistono anche PTC costituiti da silicio drogato, generalmente con boro, con una concentrazione dell'ordine dei 10¹⁶ cm⁻³ che hanno una caratteristica resistenza-temperatura più regolare. Questi ultimi indicati con la sigla KTY misurano la resistenza sfruttando il principio della spreading-resistance.

2.4.1.2 Termocoppie

La prima osservazione dell'effetto su cui si basa la realizzazione delle termocoppie è dovuta a Thomas Johann Seebeck. Ipotizzò che se due fili di materiali differenti A e B sono collegati in un circuito (vedi figura 7) con una giunzione alla temperatura T_1 e l'altra a T_2 , allora un voltmetro con impedenza infinita osserva una forza elettromotrice E di natura termoelettrica. Quest'ultima è un effetto distribuito lungo lo sviluppo del filo di ciascun singolo materiale ed esiste anche se il filo non è collegato ad alcunché [8]. La sua ampiezza E_σ dipende da una proprietà dei materiali chiamata *coefficiente di Seebeck assoluto* σ e dalla distribuzione di temperatura lungo il filo.

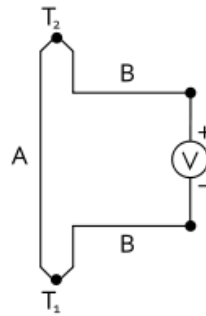


Figura 7. Circuito Seebeck

Il coefficiente di Seebeck è definito dalla relazione [8] :

$$\sigma(T) = \frac{dE_\sigma}{dT} [\mu V/K] \text{ e così } E_\sigma = \int \sigma(T) dT + C \quad (2.24)$$

Riferendo l'espressione a $0^\circ K$:

$$E_\sigma = E_\sigma(T_2) - E_\sigma(T_1) \quad (2.25)$$

Va tenuto presente che il coefficiente di Seebeck, per intervalli di temperatura estesi, non è costante, ma dipende dalla temperatura stessa in modo fortemente non lineare.

La termocoppia può essere quindi descritta in modo simile: considero, nuovamente, due fili A e B uniti in un circuito solo ad una estremità (T_1), in questo caso il sistema è interessato da un flusso di calore ma dal punto di vista elettrico il circuito è aperto (figura 8).

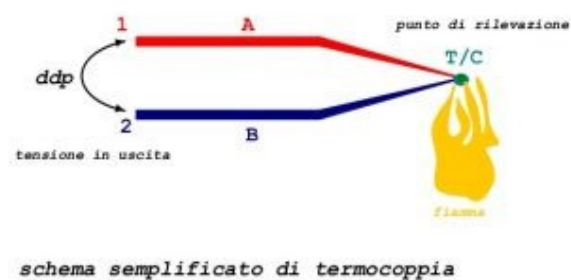


Figura 8

Poiché la concentrazione degli elettroni non è omogenea lungo il conduttore all'interno dei fili si crea un campo elettrico e quindi una d.d.p. (effetto Thomson) che è diversa per ciascun materiale (effetto Peltier). La differenza di potenziale tra le due estremità libere è uguale alla f.e.m. E_{σ} che dà luogo alla circolazione di corrente.

In generale, un buon materiale termoelettrico deve avere un'elevata conducibilità elettrica e una bassa conducibilità termica. Per verificarlo nelle circostanze di una termocoppia si considera la legge delle temperature intermedie o successive:

"Se due metalli omogenei diversi producono una forza elettromotrice $E_{1,2}$ quando i giunti sono alle temperature t_1 e t_2 ed una forza elettromotrice $E_{2,3}$ con i giunti alle temperature t_2 e t_3 , la forza elettromotrice prodotta quando i giunti sono alle temperature t_1 e t_3 vale $E_{1,2} + E_{2,3}$ " [11].

Thermocouple Type	Conductors	Temperature Range (°C)	Seebeck Coefficient	Application Environments
E	Chromel, Constantan	-200 to 900	60µV/°C	oxidizing, inert, vacuum
J	Iron, Constantan	0 to 760	51µV/°C	vacuum, oxidizing reducing, inert
T	Copper, Constantan	-200 to 371	40µV/°C	corrosive, moist, subzero
K	Chromel, Alumel	-200 to 1260	40µV/°C	completely inert
N	Nicrosil, Nisil	0 to 1260	38µV/°C	oxidizing
S	Platinum(10% Rhodium), Platinum	0 to 1480	11µV/°C	oxidizing, inert
B	Platinum (30% Rhodium) Platinum (6% Rhodium)	0 to 1820	8µV/°C	oxidizing, inert
R	Platinum (13% Rhodium), Platinum	0 to 1480	12µV/°C	oxidizing, inert

Figura 9. Tipi di termocoppie

Una termocoppia è caratterizzata oltre che dal tipo di coppia termoelettrica, dalle dimensioni dei termoelementi, dal tipo d'isolamento dei termoelementi

(elettrico, chimico e meccanico) e infine dal tipo di giunto di misura (tipo di saldatura e isolamento elettrico del giunto).

Oltre al materiale isolante si usa un pozzetto termometrico (Fig.10) in acciaio inox, inconel, molibdeno, tantalio o lega di platino per proteggere ulteriormente la termocoppia e l'isolante da agenti meccanici (elevata pressione) e chimico-fisici.

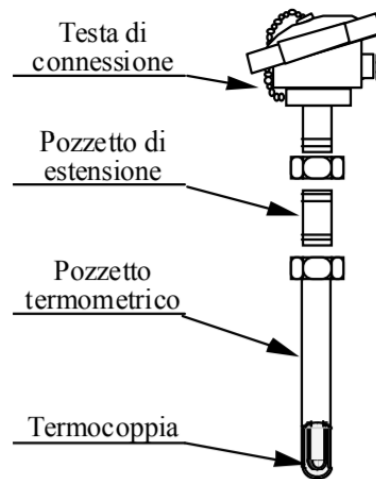


Figura 10. Copomponenti di una termocoppia

Anche l'isolamento elettrico del giunto di misura riveste una notevole importanza. I principali tipi di giunzioni sono (Fig.11): a) a giunto esposto; b) a giunto a massa; c) a giunto isolato.

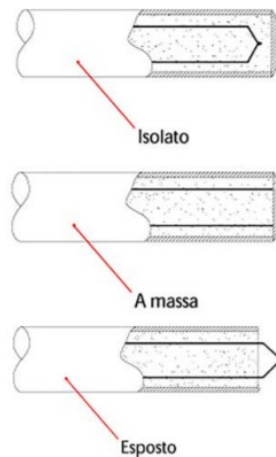


Figura 11. Metodi di isolamento del giunto

Un giunto esposto risulta economico e comporta un tempo di risposta estremamente ridotto. Un giunto a massa presenta il vantaggio di essere parzialmente protetto da agenti esterni. Un giunto isolato limita fortemente l'insorgere di loop contro terra e l'influenza di f.e.m. parassite, inoltre aumenta la reiezione al rumore del sensore. Per contro aumenta il costo della termocoppia e il suo tempo di risposta.

2.4.2 Sensori non a contatto

Per una misura effettuata senza contatto, invece, il meccanismo di trasferimento del calore è l'irraggiamento. Un sensore che misura radiazioni è costituito da un elemento sensibile incapsulato sottovuoto o in azoto in un involucro che ha una finestra ottica per lasciar passare la luce.

2.4.2.1 Pirometri

I pirometri sono strumenti utilizzati per la misura di elevate temperature ($> 1000^{\circ}\text{K}$) e basati su una misura dell'energia termica o luminosa irraggiata dal corpo in esame. Esistono due tipi di pirometri a radiazione totale e ottico.

Nel pirometro a radiazione totale si misura la temperatura d'equilibrio alla quale si porta un assorbitore quando su di esso si fa incidere la radiazione termica proveniente dal corpo in esame. In questo tipo di pirometro si sfrutta tutto lo spettro di lunghezze d'onda della radiazione emessa dal corpo, pertanto esso è utilizzabile anche a temperature relativamente basse in cui l'emissione luminosa nel visibile è del tutto trascurabile.

Questo strumento si basa sulla legge di Stephan Boltzmann ed ha come elementi essenziali: un corpo assorbitore ricoperto di nerofumo in cui è inserita la giunzione di una termocoppia, un sistema di specchi orientabili ed un cannocchiale. Regolando l'oculare, si mette a fuoco una regione del corpo in esame (sorgente) e contemporaneamente si orientano gli specchi in maniera che la radiazione proveniente dalla sorgente incida sull'assorbitore. La temperatura a cui si porta l'assorbitore (termicamente isolato dall'involucro dello strumento) è determinata dall'equilibrio tra la potenza termica da esso assorbita e proveniente dalla sorgente (W_s) e dalle pareti dello strumento (W_e) e la potenza da esso irraggiata (W_a).

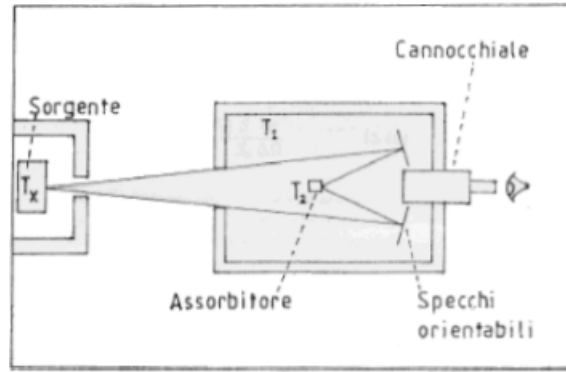


Figura 12. Schematizzazione pirometro a radiazione totale

La potenza W_s proveniente dalla sorgente è data da:

$$W_s = k \cdot S_0 \cdot \sigma \cdot T_x^4 \cdot \left(\frac{\Delta\Omega}{4\pi}\right) \quad (2.26)$$

Con:

T_x : Temperatura assoluta della sorgente

σ : Costante di Stephan Boltzmann

$\frac{\Delta\Omega}{4\pi}$: Frazione di angolo solido sotto la quale la sorgente è vista dal pirometro

S_0 : Area della sorgente

k : Coefficiente che tiene conto dell'emissività della sorgente e delle eventuali perdite nel tragitto tra sorgente e assorbitore.

All'equilibrio l'assorbitore si trova alla temperatura T_2 ed irraggia una potenza W_a pari a:

$$W_a = \varepsilon_2(T_2) \cdot S \cdot \sigma \cdot T_2^4 \quad (2.27)$$

Con:

$\varepsilon_2(T_2)$: Coefficiente di emissività della superficie del'assorbitore.

In regime stazionario imponiamo la condizione d'equilibrio tra potenza assorbita ed irraggiata è data da [12]:

$$W_e = W_s + W_a \quad (2.28)$$

da cui ricaviamo:

$$T_x = (a \cdot T_2^4 - b \cdot T_1^4)^{1/4} \quad (2.29)$$

Nel pirometro ottico invece si valuta il rapporto tra l'intensità luminosa della radiazione (nel visibile) proveniente dal corpo in esame e l'intensità luminosa di una lampada campione in cui la temperatura del filamento (nota per taratura) viene uguagliata alla temperatura incognita del corpo in esame. Questo strumento è costituito da un telescopio al cui interno è installata una lampada elettrica ed un filtro in luce rossa, posto tra la lampada e l'oculare.

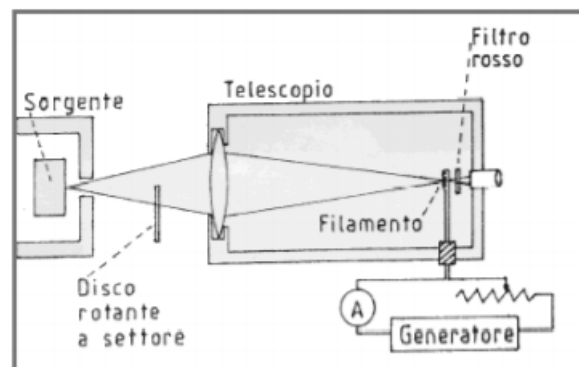


Figura 13. Schematizzazione pirometro ottico

Questo tipo di pirometro generalmente misura temperature molto elevate al disopra di 1500°K. Entrambi gli strumenti hanno il vantaggio di consentire una misura della temperatura del corpo in esame senza che sia necessario porre a contatto quest'ultimo con l'elemento sensibile e quindi possono essere usati a temperature superiori al punto di fusione di molti metalli.

2.4.2.2 Termocamere IR

La termocamera è uno strumento che rileva l'intensità della radiazione all'infrarosso di un corpo. Tale radiazione viene poi elaborata fino a sviluppare un'immagine di tipo radiometrica digitale nella quale è possibile visualizzare la temperatura dell'oggetto. Tale immagine potrà essere visualizzata come foto digitale o come video a seconda dell'utilizzo della macchina e dei software che elaborano il risultato dell'elettronica. Le termocamere presenti oggi sul mercato si dividono in due tipologie, quelle raffreddate e quelle non raffreddate. Le precisioni più alte si ottengono con le termocamere raffreddate, che presentano però problematiche inesistenti nell'altro gruppo.

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

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

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

I sensori a quanti operano in base all'effetto fotoelettrico, sono costituiti da materiali semiconduttori in grado di assorbire fotoni e di trasformarli in corrente elettrica e hanno tempi di risposta molto rapidi;

I sensori termici, più economici, presentano una buona risposta su tutta la lunghezza d'onda dello spettro e sono costituiti da materiali metallici o semiconduttori. Assorbono l'energia irraggiata dall'oggetto, misurano la variazione della temperatura in relazione alla variazione delle proprietà elettriche e hanno un elevato tempo di risposta. (I termo-rilevatori più comuni sono rappresentati da termocoppie e bolometri).

Le termocamere raffreddate montano sensori miniaturizzati, detti fotorilevatori, dispositivi realizzati con materiali semiconduttori nei quali il rilascio di cariche elettriche è direttamente proporzionale all'assorbimento dei fotoni, perciò, al diminuire della temperatura del rilevatore aumenta la precisione.

Le termocamere non raffreddate, invece, montano un sensore costituito da un microbolometro realizzato mediante una matrice di rilevatori più grande è la matrice più è alta la precisione. Nei microbolometri è la temperatura stessa del rilevatore a cambiare quando è colpita dalle radiazioni infrarosse, sono quindi più lenti.

Il sistema di scansione che è necessario per acquisire le immagini, è costituito da un sistema di specchi (due specchi e due prismi rotanti) in grado di scansionare l'immagine e imprimere ogni punto sul sensore stesso.

L'ottica, costituita da lenti al germanio, impedisce l'ingresso allo spettro della radiazione visibile ma è trasparente per la banda dell'infrarosso. (le termocamere non raffreddate prevedono la sostituzione delle lenti o l'utilizzo di ottiche aggiuntive).

La principale differenza tra le termocamere raffreddate e quelle non raffreddate è la presenza, nelle prime, di un sistema di raffreddamento necessario per garantire alta precisione e un'immagine priva di disturbi.

Esistono quattro tipi diversi di sistemi di raffreddamento [13]:

1. Sistema criogenico a circuito aperto: viene inserito nel circuito (all'interno di un vaso di Dewar) dell'azoto liquido (-196°C). Una volta terminato

l'azoto, l'operatore deve provvedere a riempire nuovamente il vaso di Dewar. Comporta problemi legati al trasporto ed immagazzinamento dell'azoto liquido, di sicurezza per gli operatori, di apparecchiature ingombranti che spesso necessitano di sistemi di alimentazione supplementari;

2. Sistema aperto: viene inserito dell'argon allo stato liquido (-186°C) sfruttando l'effetto Joule-Thomson. Presenta le stesse problematiche del sistema criogenico;
3. Sistema termoelettrico (-70°C): sfrutta l'effetto Peltier per cui una corrente elettrica che scorre tra due metalli o semiconduttori differenti posti in contatto (giunzione Peltier) produce un trasferimento di calore. È l'opposto dell'Effetto Seebeck.
4. Sistema a ciclo Stirling: questo sistema riesce a sottrarre una grande quantità di calore mantenendo il sensore alla temperatura di -197°C utilizzando cicli frigoriferi di compressione ed espansione realizzati mediante una pompa a pistone in un circuito chiuso di elio in fase gassosa.

Le termocamere non raffreddate quindi sono più pratiche, richiedono meno manutenzione e hanno migliori tempi di risposta.

Esistono diversi parametri che caratterizzano le termocamere in commercio [14]:

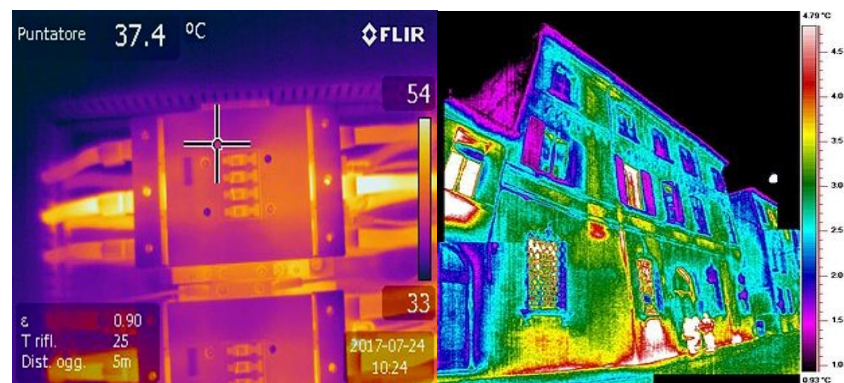
1. Range di ripresa: la scala termica che l'operatore andrà a considerare durante la battuta termica.
2. Risoluzione termica: Massima differenza in termini di gradi che il sensore della termocamera è in grado di percepire su una medesima immagine. Maggiore è la risoluzione termica, migliore è il sensore e quindi migliore è la sua risposta.
3. Range spettrale: Finestra dello spettro infrarosso che la termocamera va ad analizzare. Esistono due diversi tipi di range short wave (equivalente all'infrarosso medio = 2-5 μm) e long wave lontano infrarosso. Le termocamere che lavorano in long wave non risentono della colorazione dell'oggetto ma devono impiegare un vetro opaco.
4. Risoluzione geometrica: equivale al numero di pixel che compongono la matrice del sensore stesso.
5. FOV (o TFOV): letteralmente FIELD OF VIEW detto anche TOTAL FIELD OF VIEW cioè campo di osservazione totale; rappresenta l'angolo di ripresa dell'ottica espresso in gradi angolari ovvero l'area che la termocamera è in grado di vedere in funzione della distanza.
7. IFOV (Instantaneous Field Of View): Indica quanto è grande la superficie analizzata da un singolo pixel del sensore ad una determinata distanza. Se il pixel è più grande dell'oggetto da misurare allora verrà rilevato anche il rumore di fondo.

8. Obiettivo: sono ottiche aggiuntive.
9. Frequenza di acquisizione: Indica la quantità di immagini che la termocamera è in grado di acquisire in un secondo (frame-rate).

Per ottenere una buona immagine termografica è necessario considerare oltre ai parametri costruttivi sopra elencati anche alcuni parametri fisico ambientali [15]:

1. Trasmissione atmosferica: l'opacità dell'atmosfera rappresenta un fattore di assorbimento delle onde emesse dall'oggetto in esame, fattore che andrà ad aumentare all'aumentare della distanza con l'oggetto.
2. Temperatura ambiente: influenza in valori di temperatura che vengono poi segnalati dallo strumento.
3. Ottimizzazione dell'immagine: per rendere visibile l'immagine dell'oggetto analizzato all'infrarosso, la termocamera effettua una conversione con falsi colori cioè viene adottata una palettatura di colori con la quale l'immagine viene resa visibile. Esistono principalmente quattro palettature per la visualizzazione dell'immagine: palettatura "Ferro", "Arcobaleno", "Scala di Grigi" e "Isotermica" (figura 14).
4. Range di temperatura: mi permette di escludere o includere alcuni soggetti nell'immagine termografica
5. Emissività dell'oggetto: la scelta dell'emissività è importante per fare un'accurata misura della temperatura dell'oggetto.

Tutti questi parametri possono e devono essere settati prima di effettuare la misurazione.



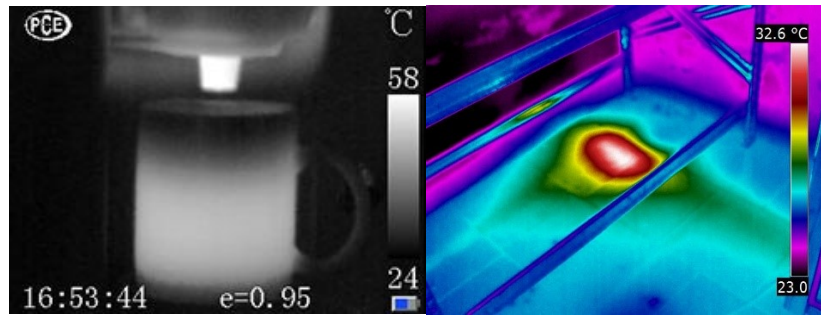


Figura 14. Esempio di immagini termografiche

3. METODI PER LA MISURAZIONE DELL'EMISSIVITÀ

Esistono diversi metodi per la valutazione dell'emissività che differiscono in base alle caratteristiche del materiale in esame (fase del campione, levigatezza, rugosità, trasparenza, presenza di film o rivestimenti di ossido, particolare macrostruttura) o in base al tipo di quantità misurata (emissività direzionale, emisferica, spettrale e totale).

Per semplicità è possibile effettuare una prima distinzione tra **metodi diretti** e **metodi indiretti**. Nel primo caso si misura direttamente l'emissività, nel secondo l'emissività si ricava da altre quantità sfruttando le relazioni e le proprietà viste nel capitolo precedente.



Figura 15. Classificazione metodi di misurazione dell'emissività

3.1 Metodi indiretti

Il metodo indiretto più comunemente usato per determinare l'emissività consiste nello sfruttare la riflettività emisferica direzionale dei campioni opachi usando l'equazione vista in precedenza (Eq. 2.9). La componente diffusa e speculare della riflettività emisferica direzionale viene rilevata applicando una sfera integratrice [16]. Una sfera integratrice (o sfera di Ulbricht) è una delle apparecchiature più utilizzate per la misura di grandezze fotometriche, soprattutto nei laboratori di ricerca; si tratta di una sfera cava con superficie interna perfettamente diffondente che consente la riflessione totale della luce,

che può entrare attraverso una piccola fessura. Questa viene utilizzata sia per illuminare emisfericamente un campione mentre viene rilevata la radiazione riflessa direzionale, sia per rilevare radiazione riflessa emisfericamente mentre il campione è illuminato direzionalmente.

Un modo alternativo per ricavare l'emissività non utilizzando la sfera integratrice consiste nell'utilizzare un goniometro per misurare la radiazione riflessa direzionalmente e diffusamente a tutti gli angoli. Tale metodo è però efficace per lunghezze d'onda molto lunghe quindi quando la rugosità della superficie diventa piccola rispetto alla lunghezza d'onda.

Lo strumento che sfrutta la relazione tra emissività e riflettività viene chiamato **riflettometro** e permette di determinare la riflettività (e quindi l'emissività) nell'intervallo del vicino infrarosso, visibile a temperature moderate. Mentre una misurazione diretta dell'emissività richiede che il campione sia misurato a temperature molto elevate per ottenere un rapporto segnale-rumore sufficiente a lunghezze d'onda corte.

Ovviamente il metodo indiretto porta con sé anche alcuni svantaggi, infatti le misurazioni in una sfera di integrazione sono tecnicamente difficili specie se fatte a temperature elevate e per lunghezze d'onda più lunghe la riflettività della parete delle sfere diventa sempre più speculare.

Un altro metodo indiretto sfrutta la relazione tra assorbimento spettrale direzionale e l'emissività spettrale direzionale, ovvero la legge di Kirchhoff. L'assorbimento viene determinato attraverso la misurazione del tempo di riscaldamento di un campione quando illuminato da un raggio laser, una tecnica, questa, sfruttata negli spettrofotometri. Un esempio sono gli **spettrofotometri infrarossi**, dotati di sistema monocromatore (a dispersione), essi sono in grado di effettuare con sufficiente accuratezza la misura nell'intero intervallo di lunghezze d'onda della curva del corpo nero a 10°C richiesto per la determinazione dell'emissività. Questi spettrofotometri non vengono più prodotti e non sono più disponibili sul mercato a favore dei più moderni, veloci e versatili **spettrofotometri a Trasformata di Fourier (FTIR)**. Questi ultimi consentono la misura accurata in un intervallo IR ridotto rispetto agli spettrofotometri dispersivi [17].



Figura 16. Spettrofotometro

3.2 Metodi diretti

I metodi calorimetrici per la determinazione dell'emissività si basano sul trasferimento di calore tra il campione e l'ambiente e sono classificati in due gruppi: regime stazionario e regime dinamico (transitorio). Il primo metodo è caratterizzato da un equilibrio termico del campione con il suo ambiente. Conoscendo la temperatura di quest'ultimo e la potenza elettrica necessaria per mantenere una temperatura costante del campione, si può calcolare l'emissività totale emisferica. L'applicazione del metodo dinamico comporta la soluzione dell'equazione del bilancio termico che descrive il comportamento temperatura-tempo di un campione durante il suo riscaldamento e raffreddamento.

I metodi calorimetrici consentono solo di ottenere l'emissività totale emisferica, uno svantaggio significativo per la completa caratterizzazione ottica di un materiale.

Un esempio di determinazione dell'emissività totale emisferica mediante calorimetria a stato stazionario usando l'equilibrio termico tra un campione e una superficie del ricevitore è rappresentato dall'**emissometro**. Lo strumento misura l'emissività emisferica totale tramite la relazione [18]:

$$\Delta V \propto \frac{\sigma_0 \cdot (T_{emissometro}^4 - T_{sup,campione}^4)}{\frac{1}{e_{ter,campione}} + \frac{1}{e_{ter,emissometro}} - 1} \quad (3.1)$$

Con:

ΔV : Variazione voltaggio

σ_0 : Costante di Stefan-Boltzmann

T: Temperatura

e_{ter} : Emissività termica

Il segnale restituito è proporzionale al flusso termico scambiato per irraggiamento tra la superficie del campione e la superficie e la superficie inferiore dello strumento.

Lo strumento viene calibrato prima di ogni prova mediante misure di due differenti campioni con emissività note. La linearità è tale da assicurare misure di emissività con incertezza inferiore a ± 0.01 nell'intervallo $0.03 \leq e_{ter,campione} \leq 0.93$.

Il campione per essere analizzato va riscaldato e se presenta una conduttività termica ridotta, la superficie osservata si troverà ad una temperatura superiore al valore ambiente, perciò, occorre effettuare una correzione del valore di emissività restituito dallo strumento.



Figura 17. Emissometro

Il metodo radiometrico consiste in un confronto diretto della radiazione proveniente da un campione a temperatura omogenea e stabile con la radiazione proveniente da un corpo nero di temperatura nota, secondo la definizione di emissività data nel capitolo 1.3.2. I metodi radiometrici diretti sono realizzati con un'ampia varietà di tecniche che dipendono dal tipo di campione, dall'intervallo spettrale e dalla temperatura di interesse. Differiscono anche nella realizzazione pratica dei corpi neri di riferimento, del riscaldamento del campione, e della strumentazione per ottenere una risoluzione spettrale. Tipicamente, il corpo nero è stabilizzato alla stessa temperatura del campione ma possono anche essere confrontati a temperature diverse per raggiungere, ad esempio, livelli di radiazione totali approssimativamente uguali.

La tecnica più comunemente utilizzata prevede di confrontare la temperatura misurata da un sensore a contatto che garantisca elevata accuratezza (termocoppia o termoresistenza) ed uno non a contatto come il pirometro o la termocamera. La differenza di temperatura così ricavata, inserita nella formula di Stephan-Boltzmann (Eq. 2.7), permette di calcolare l'emissività.

Nello specifico ipotizziamo di utilizzare una termocamera; per prima cosa si deve misurare la temperatura riflessa e impostare tale valore sulla termocamera, successivamente si passa alla misura della temperatura con il termometro a contatto. Fatto ciò, impostiamo l'emissività della termocamera a 1 (considerando quindi l'oggetto in esame come un "corpo nero"). Si noterà che la temperatura che la termocamera rileva e la temperatura misurata con il termometro sono diverse, questo è dovuto al fatto che l'emissività dell'oggetto non è 1 ma è più bassa. Per settare correttamente la termocamera dovremmo quindi ridurre il valore dell'emissività fino ad ottenere un valore di temperatura uguale o abbastanza simile a quella rilevata dal termometro a contatto. [19]

Dove non sia possibile effettuare una misurazione della temperatura diretta si può procedere nel seguente modo: si effettua una misura con la termocamera dell'oggetto reimpostando la temperatura riflessa, una volta fatto si applica sulla superficie dell'oggetto una delle seguenti alternative [20]:

- Pezzo di nastro isolante nero o nastro ad emissività nota;
- Rivestimento o vernice alto-emissiva con emissività nota;
- Spesso strato di olio resistente al calore (per spesso strato s'intende maggiore di 0,13 mm) impostando l'emissività pari a $\varepsilon = 0.82$;
- Spesso strato di fuliggine, impostando l'emissività pari a $\varepsilon = 0.95$.

Una volta scelta l'alternativa con la quale rivestire parte o tutto l'oggetto andremo a fare un'ulteriore indagine dove le temperature rilevate sull'oggetto saranno prese come riferimento. A questo punto, come è stato fatto nel caso di rilievo con il termometro a contatto, andremo a settare il valore di emissività modificandolo fino ad ottenere un valore di temperatura simile (o addirittura uguale) a quella di riferimento giungendo al reale valore di emissività.

L'emissività può anche essere misurata in mancanza di un riferimento, in questo caso l'emissività direzionale è calcolata risolvendo il sistema di equazioni ottenute utilizzando due telecamere IR per bande di lunghezze d'onda diverse.

3.3 Caratterizzazione dell'emissività di alcuni materiali ad alte temperature

Il trasferimento di calore radiante, come abbiamo visto, svolge un ruolo importante in molte applicazioni di ingegneria, perciò una conoscenza accurata dell'emissività di tutte le superfici ad alte temperature, come quelle che si possono avere in una fornace industriale, sono un requisito essenziale.

Negli ultimi anni è aumentata la necessità di disporre di dati più precisi sull'emissività dei solidi ceramici e metallici per via del loro largo uso nei forni di industrie metallurgiche e del vetro.

Sebbene siano disponibili ampie raccolte di dati sulla radiazione termica per metalli e anche per solidi non metallici [21, 22], ciò non include alcuni materiali tecnici. La natura e le proprietà ottiche della superficie di un materiale possono cambiare durante l'uso e questo si accentua in forni ad alte temperature dove i metalli, per esempio, possono essere ricoperti di ossido. Questo problema è stato intensificato dalla volontà di aumentare la produttività del forno mediante l'uso di rivestimenti in fibra ceramica o "ad alta emissività". Si è visto che la bassa emissività delle fibre di ceramica non garantisce un gran risparmio energetico mentre l'uso di rivestimenti ad alta emissività, come il refrattario, permette una maggiore velocità di trasferimento del calore oltre a proteggere il forno.

3.3.1 Materiali basso-emissivi

I metalli sono materiali basso-emissivi, che presentano un'elevata emissività a basse lunghezze d'onda; viceversa, sono caratterizzati da una più bassa emissività ad alte lunghezze d'onda e basse temperature. In Figura 19 e Figura 20 sono mostrati degli esempi di valori di emissività di alcuni metalli in funzione rispettivamente della temperatura e della lunghezza d'onda. È possibile notare come l'emissività delle superfici metalliche pure è bassa, essendo per esempio inferiore a 0,1 per il platino e l'acciaio N-155, mentre aumenta lentamente con la temperatura ed in particolar modo con l'ossidazione della superficie, ad esempio fino a circa 0,8 per l'acciaio inossidabile fortemente ossidato.

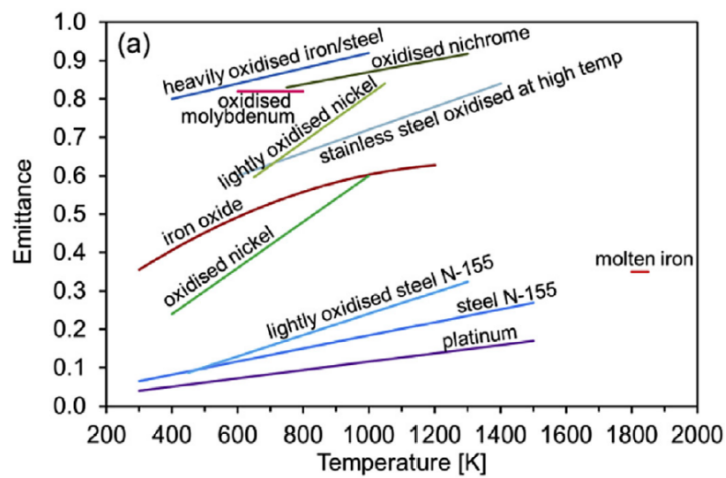


Figura 18. Emissività di alcuni metalli in funzione della temperatura

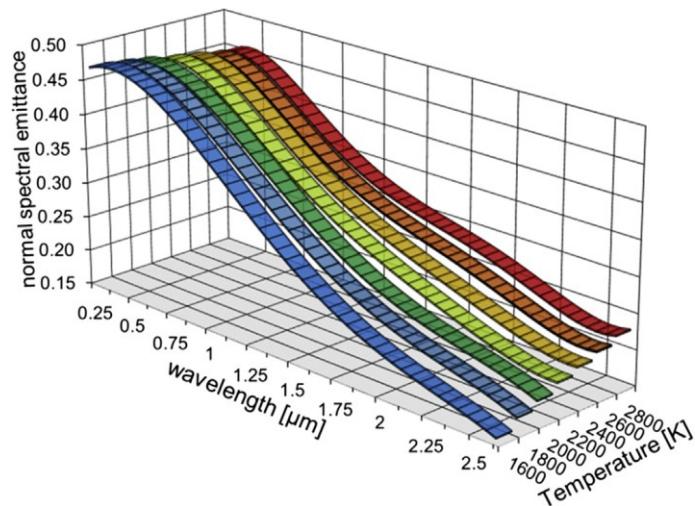


Figura 19. Emissività del tungsteno in funzione della lunghezza d'onda

3.3.2 Materiali alto-emissivi

I materiali non conduttori, come la ceramica, hanno un comportamento spettrale più complesso che può essere ulteriormente complicato dalla rugosità della superficie e dalla purezza. La Figura 21 mostra la variazione dell'emissività in funzione della temperatura di alcuni materiali refrattari. Le ceramiche ad altissima temperatura, che sono spesso più scure e costituite da materiali conduttori come carburi, nitruri e boruri, presentano elevate emissività nell'intervallo di temperatura. Gli ossidi di alluminio, magnesio e titanio di colore chiaro hanno un'elevata emissività a basse temperature ma diminuiscono alle temperature del forno a circa la metà del loro valore iniziale.

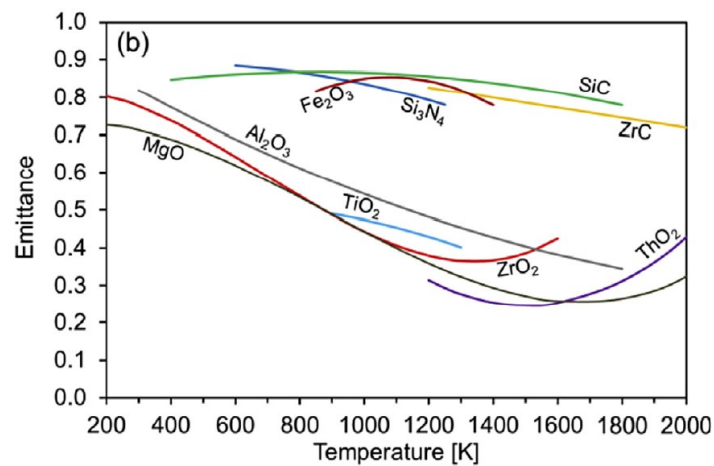


Figura 20. Emissione totale di alcuni ossidi inorganici e refrattari

L'emissività totale della ceramica ad alte temperature è generalmente di circa 0,6 ma vi sono alcune variazioni nei valori a seconda della composizione (Fig. 22). Parlando nello specifico dei materiali refrattari l'emissione spettrale è piuttosto bassa (in genere inferiore a 0,6) e per lunghezze d'onda inferiori a 5,6 mm e temperature superiori a circa 1000 K, l'emissività totale tende ad essere inferiore tra 0,4 e 0,3 circa.

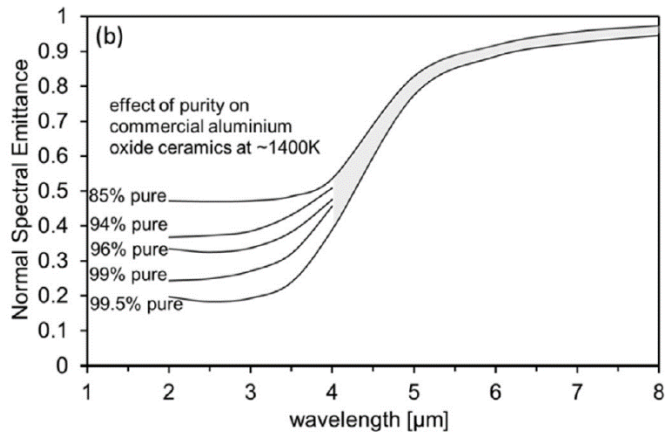


Figura 21. Emissività normale della ceramica all'ossido di alluminio in funzione della lunghezza d'onda

3.3.3 Problematiche di acquisizione ad elevate temperature

Ogni materiale reagisce diversamente alle alte temperature modificando le sue proprietà chimiche o fisiche che sono legate, come abbiamo visto, al valore di emissività. Generalizzando per materiali basso e alto emissivi si possono notare alcune proprietà che influiscono maggiormente.

Per i materiali basso emissivi, i principali fattori da tenere in considerazione nel caso di misure ad alte temperature sono:

- Ossidazione
- Rugosità

Nell'acquisizione di dati sull'emissività ad elevate temperature il principale problema da affrontare nei materiali basso emissivi è l'errore di misurazione che dipende dalla variazione della rugosità superficiale per effetto della corrosione. Quando parliamo di corrosione ci riferiamo ad una reazione chimica, l'ossidazione, che comporta la formazione di una patina di ossido di metallo sulla superficie del conduttore a contatto con un agente ossidante (ossigeno, fluoro, cloro, bromo). La velocità di tale reazione è proporzionale alla temperatura ecco perché a basse temperature una misurazione in ambiente ossidante non comporta un errore rilevante al contrario ad alte temperature l'errore non è più trascurabile. Questo fenomeno non solo cambia l'emissività ma modifica anche le proprietà spettrali a seconda dello spessore dello strato di ossido (fig. 21) infatti il film di ossido è semi-trasparente alle radiazioni, perciò, le proprietà di radiazione spettrale dei materiali ossidati sono correlate alla natura e spessore del film di ossido [23].

Risulta evidente quindi la necessità di operare nel vuoto (ambiente privo o quasi di ossidanti) o di effettuare le opportune correzioni. Un'ulteriore soluzione potrebbe essere quella di limitare il tempo di esposizione del conduttore agli agenti ossidanti, infatti se è vero che l'elevata temperatura accelera la corrosione è pur vero che innalzando molto rapidamente la temperatura l'errore potrebbe risultare trascurabile.

L'effetto della granulometria del materiale sull'emissività è stato indicato da misurazioni sperimentali a 1200°C nella Tabella 2.

Oxide	Grain size (μm)	Emissivity
Al ₂ O ₃	2–25	0.35
	15–80	0.43
	90–120	0.53
MgO	1–3	0.30
	30–75	0.39
	90–120	0.48
Cr ₂ O ₃	0.5–1.5	0.72
	1.5–8	0.95

Tabella 2. Effetti della Granulometria a 1200°C

Per quanto riguarda i materiali alto emissivi invece, alle alte temperature risentiranno principalmente dei seguenti fattori:

- Composizione
- Rugosità
- Depositi superficiali

Nell'acquisizione di dati sull'emissività ad elevate temperature per materiali alto emissivi gli errori dipendono principalmente dalla misurazione della temperatura superficiale, ma anche dal fatto che l'emissività ha una forte variazione con la temperatura. Infatti, le proprietà radiative dei materiali fibrosi sono determinate non dallo strato superficiale ma dalla dispersione e dall'assorbimento da parte delle particelle sotto la superficie.

Per la stessa composizione di materiale, si è rivelato difficile misurare gli effetti della variabilità dell'emissività superficiale poiché, per natura, i materiali refrattari sono emettitori e riflettori diffusi e questo aspetto non è molto influenzato dalla rugosità superficiale.

Tale comportamento lo possiamo osservare negli ossidi di zirconio e di torio che diventano elettricamente conduttivi a temperature più elevate e riducendo così l'emissività.

Nella pratica i materiali refrattari vengono anche utilizzati come rivestimenti di forni per questo le loro proprietà dipendono anche dai depositi di scorie, fuliggine o carbone che se non eliminati determinano un errore nelle misurazioni.

4. MATERIALI E METODI DI MISURA

4.1 Set-up sperimentale

In base ai dati raccolti e agli strumenti che avevamo a disposizione, il metodo radiometrico diretto è stato valutato come il più adatto allo scopo.

Tale metodo consiste in un confronto diretto della radiazione proveniente da un campione a temperatura omogenea e stabile con la radiazione proveniente da un corpo nero di temperatura nota, come descritto nel capitolo precedente.

In letteratura è stato inoltre visto come i materiali si ossidano quando sottoposti a un riscaldamento lento e continuo fino alle alte temperature.

L'ossidazione comporta una variazione della rugosità superficiale e della radiazione spettrale impedendo una corretta misurazione dell'emissività.

Alla luce di queste informazioni, si è scelto di utilizzare un becco di Bunsen come fonte di calore, riducendo notevolmente i tempi di riscaldamento e l'ossidazione del campione (posizionandolo alla giusta altezza della fiamma).

Il set-up sperimentale, mostrato in figura 23, è stato caratterizzato dai seguenti dispositivi:

1. Una **termocamera IR** ('VarioCAM® HD head 800') con specifiche:
 - Intervallo spettrale: (7.5 ... 14) μm
 - Rilevatore: Matrice del piano focale per microbolometro non raffreddato
 - Formato del rilevatore (IR pixels): (1,024 \times 768)
 - Campo di misura della temperatura: (-40 ... 2,000) $^{\circ}\text{C}^*$
 - Accuratezza di misurazione: ± 1 $^{\circ}\text{C}$ or ± 1 %*
 - Risoluzione della temperatura: @ 30 $^{\circ}\text{C}$ Up to 0.02 K*
 - Frequenza dei fotogrammi: Full-frame: 30 Hz (1,024 \times 768), sub-frame formats*: 60 Hz (640 \times 480)/ 120 Hz (384 \times 288) / 240 Hz (1,024 \times 96)

La termocamera è stata posizionata in maniera perpendicolare rispetto al provino. L'angolazione è stata impostata accuratamente con un angolo di vista compreso fra 5° e 60° (figura 22), in maniera tale da evitare riflessi nel vetro della termocamera e ridurre l'errore sulla misura di temperatura.

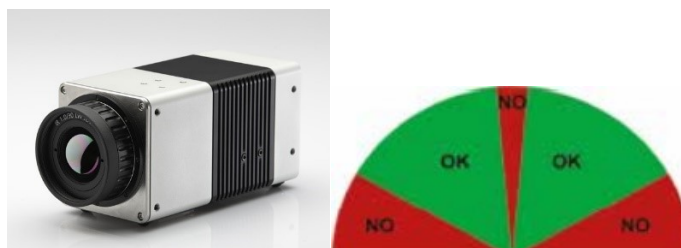


Figura 22. Termocamera IR (sinistra) e corretta angolazione rispetto al provino (destra)

2. Un **Becco di Bunsen** (bruciatore a gas), che è stato utilizzato per scaldare rapidamente il provino ad una temperatura fino a 600°C. Tale strumento è composto da uno zoccolo con il tubo da cui giunge il combustibile gassoso, che presenta all'estremità finale un beccuccio, e da un tubo verticale, all'imboccatura del quale viene acceso il gas. Il tubo verticale è forato in due punti per l'accesso dell'aria ed è ricoperto da un manicotto, anch'esso munito di due buchi: ruotando il manicotto si può regolare quanto i suoi buchi coincidano con quelli del tubo (figura 23). In questo modo è possibile avere una maggiore o minore quantità di aria aspirata per “effetto Venturi” e quindi ottenere una fiamma di diversa natura, ossidante (colore blu) o riducente (colore arancio). Inoltre, si sono utilizzati dei mattoni refrattari per convogliare il calore generato dal Becco di Bunsen sul provino. La disposizione è stata scelta con l'intento di garantire stabilità della fiamma e riscaldamento uniforme e omogeneo del provino.

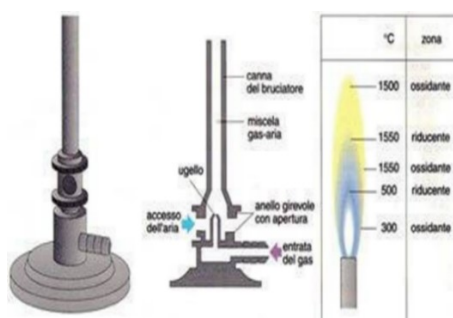


Figura 23. Schema del Becco Bunsen

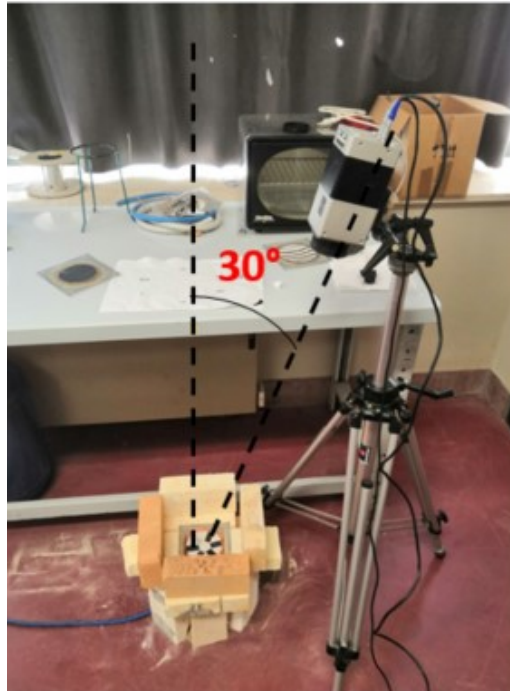


Figura 24. Set-up sperimentale

Il provino è stato realizzato verniciando un supporto ceramico con le cinque vernici alto-emissive, diverse per temperature massime raggiunte e per proprietà fisico-chimiche (Tabella 3).

Le vernici sono state applicate rispettando le indicazioni di essiccazione riportate in tabella e sono state disposte radialmente sul supporto per poter poi selezionare delle aree alla stessa distanza dal centro, così che il gradiente fra un'area e l'altra sia il più basso possibile. Inoltre, poiché per la vernice HiE-Coat 840-CM il fornitore ha comunicato il datasheet con i valori teorici di emissività calcolati alle diverse temperature, tale vernice è stata selezionata come riferimento e applicata in due zone (superiore e inferiore) del provino (fig. 24). Più precisamente, il valore di emissività considerato è la media ottenuta nel range di temperature comprese tra 300 e 900 °C, pari a $\varepsilon_{media} = 0.94$.

Nome vernice	RUST	HIE-Coat 840-CM	HIE-Coat 840-C	VHT SPB102	TERMOTI X
T_{max}	750°C	1093°C	1093°C	1093°C	650°C
Fornitore	Rawlins Paints(UK)	AREMCO	AREMCO	VHT	TIXE(IT)
Costo	13 €	213 €	213 €	31 €	20 €
Messa in opera	24h a T_{amb}	1h a T_{amb} , 1h a 100°C, 1h a 250°C	24h a T_{amb}	24h a T_{amb}	24h a T_{amb}

Tabella 3. Vernici alto-emissive

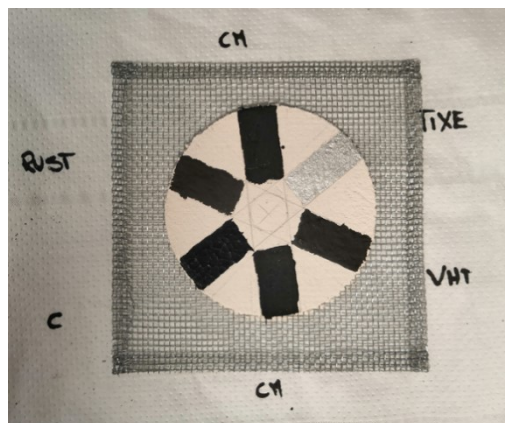


Figura 25. Provino

4.2 Acquisizione ed Elaborazione delle immagini IR

L'acquisizione dei dati è stata effettuata impostando sul programma di gestione della termocamera 'IRBIS 3 PLUS':

- $\epsilon = 1$
- $T_{\text{esterna}} = 25^{\circ}\text{C}$
- Range di temperatura tra 200 e 1200°C
- Durata acquisizione 240'' (120'' riscaldamento, 120'' raffreddamento)

Tramite un algoritmo creato con Matlab è stato possibile elaborare e processare tutti i fotogrammi estratti dalla termocamera sotto forma di file.txt. Di seguito è riportato il codice frammentato in tante parti quante le operazioni svolte che sono raccolte nello schema a blocchi di figura 25:

- La funzione 'importdata' consente di importare le Immagini IR.txt:

```
clear
close all
clc
%1
endFileName = ('*.txt');

filepattern = fullfile(endFileName);
txtfiles = dir(filepattern);

mean_tot_1 = [];
mean_value_multiple=[];

%% importo tutti i dati
for i=1:length(txtfiles)
    I(i)= importdata(fullfile(txtfiles(i).name));
end
```

- Selezione delle aree verniciate (figura 27) e non verniciate (figura 26) evitando le zone con divario superiore a 50°C tramite la funzione "imcrop" e calcolo della temperatura media all'interno delle aree selezionate tramite la funzione "mean2":

```

%% ritaglio n aree sulla prima immagine
for n=1:4
    for n=1:4
        I1 = imagesc(I(1).data , 'CDataMapping', 'scaled');
        colormap(jet);colorbar;
        [I2{n} rect{n}]=imcrop(I1);
    %
        mean_value{n} = mean2(I2{n});
    %
        mean_tot_1 = [mean_tot_1,mean_value{n}];
    end
end

%% ritaglio le n stesse aree sulle altre immagini
for i=1:length(txtfiles)

    for n=1:4
        I3{i,n}= imcrop(I(i).data, rect{n});
        mean_value_multiple{i,n}= mean2(I3{i,n});
    end
end
end

```

- Calcolo dei gradienti di correzione ottenuti sottraendo alla temperatura media in R5 le temperature medie delle altre zone:

```

%% Gradiente_rif
[camera, foldername] = uigetfile('*', 'Select T_rif file', ...
    'MultiSelect', 'on');
camera_dir = fullfile(foldername,camera);
T_rif=importdata(camera_dir);

T_rif=smoothdata(T_rif.data(:,2:7),'movmedian',50);

grad_R5_R4=(T_rif(:,2)-T_rif(:,1));
grad_R5_R6=(T_rif(:,2)-T_rif(:,3));
grad_R5_R7=(T_rif(:,2)-T_rif(:,4));
grad_R5_R8=(T_rif(:,2)-T_rif(:,5));
grad_R5_R9=(T_rif(:,2)-T_rif(:,6));

```

- Correzione del valore di temperatura media delle zone verniciate tramite i gradienti ottenuti:

```

%% Correzione_vernici
[camera, foldername] = uigetfile('*', 'Select T_vernice file',
    'MultiSelect', 'on');
camera_dir2 = fullfile(foldername,camera);
T_vernice=importdata(camera_dir2);

T_vernice=smoothdata(T_vernice.data(:,2:7),'movmedian',50);

T_vernice_Tixe=(T_vernice(1:end,1)+grad_R5_R4(1:end));
T_vernice_VHT=(T_vernice(1:end,2)+grad_R5_R6(1:end));
T_vernice_CM_bottom=(T_vernice(1:end,3)+grad_R5_R7(1:end));
T_vernice_C=(T_vernice(1:end,4)+grad_R5_R8(1:end));    %(1:210)
T_vernice_RUST=(T_vernice(1:end,5)+grad_R5_R9(1:end));
T_vernice_CM_top=(T_vernice(1:end,6)+grad_R5_R9(1:end));

ref_x = [300 400 500 600];
e_value_C=[0.934 0.946 0.945 0.934];

```

- Calibrazione della vernice di riferimento “CM” con valore di emissività settato a 0.94:

```
%% correzione epsilon_CM=0.94
```

```
temp_CM_corrected_top= T_vernice_CM_top*nthroot(1/0.94,4);
temp_CM_corrected_bottom= T_vernice_CM_bottom*nthroot(1/0.94,4);
```

- Calcolo dell'emissività di tutte le vernici rispetto a quella di riferimento "CM":

```
%% Calcolo emissività vernici
```

```
T_CM_top=(((temp_CM_corrected_top)+273).^4); %reference top
T_CM_bottom=(((temp_CM_corrected_bottom)+273).^4); %reference bottom
```

```
T_C=(((T_vernice_C)+273).^4);
e_value_C= T_C(:)./T_CM_bottom(:);
```

```
T_RUST=(((T_vernice_RUST)+273).^4);
e_value_RUST= T_RUST(:)./T_CM_top(:);
```

```
T_VHT=(((T_vernice_VHT)+273).^4);
e_value_VHT= T_VHT(:)./T_CM_bottom(:);
```

```
T_Tixe=(((T_vernice_Tixe)+273).^4);
e_value_Tixe= T_Tixe(:)./T_CM_top(:);
```

- Produzione di un grafico sull'andamento dell'emissività delle vernici, eccetto "CM", rispetto alla temperatura:

```
%% plot emissivty
```

```
figure
```

```
plot(T_rif(:,2),e_value_RUST,'-', 'MarkerFaceColor', 'b','DisplayName','\epsilon_RUST' ); hold on
plot(T_rif(:,2),e_value_C,'-', 'MarkerFaceColor', 'r','DisplayName','\epsilon_C' ); hold on
plot(T_rif(:,2),e_value_VHT,'-', 'MarkerFaceColor', 'g','DisplayName','\epsilon_VHT' ); hold on
plot(T_rif(:,2),e_value_Tixe,'-', 'MarkerFaceColor', 'c','DisplayName','\epsilon_Tixe' ); hold on
```

```
xlabel('T (°C)')
```

```
ylabel('Emissivity')
```

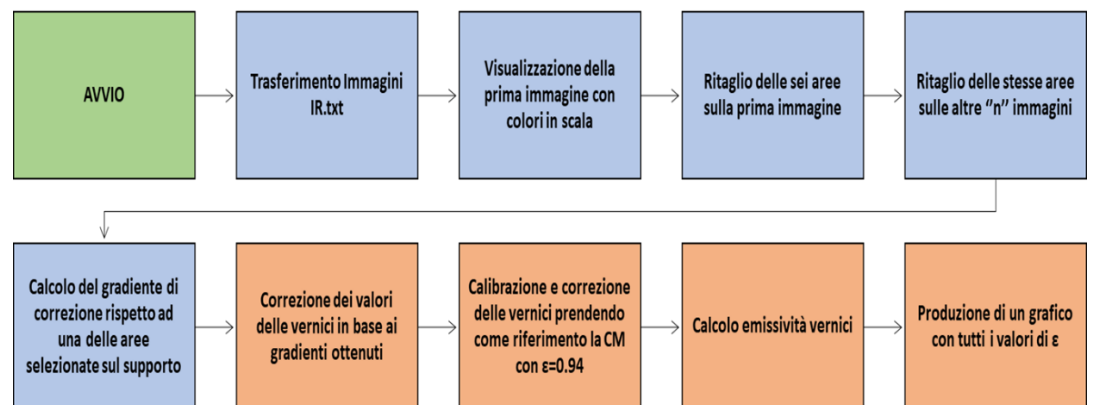


Figura 26. Fasi elaborazione immagini termiche con algoritmo

5. RISULTATI

Il ritaglio delle sei aree è stato effettuato manualmente solo sulla prima immagine selezionando delle piccole zone rettangolari, tutte lungo la stessa corona circolare, di uguale area, per ridurre gli effetti dovuti al gradiente radiale. Tale operazione è stata ripetuta due volte, prima sulle aree del supporto (figura 27) poi sulle aree verniciate (figura 28), ottenendo le seguenti immagini:

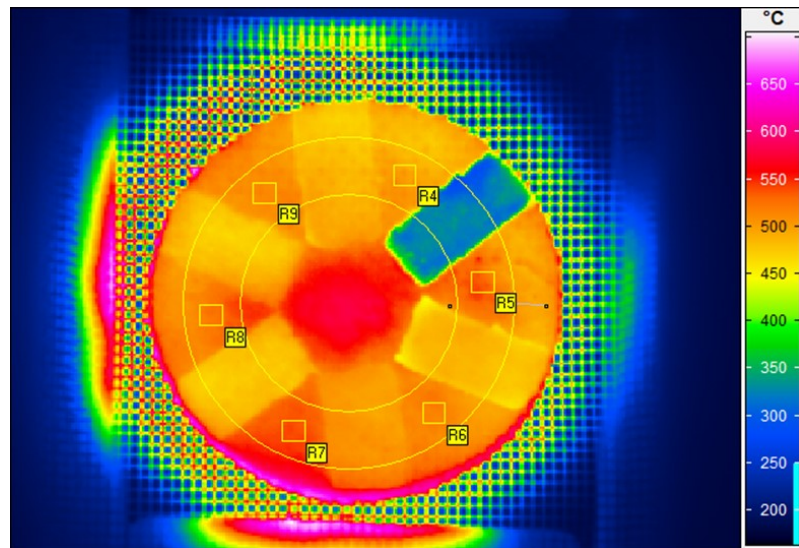


Figura 27. Ritaglio aree del supporto

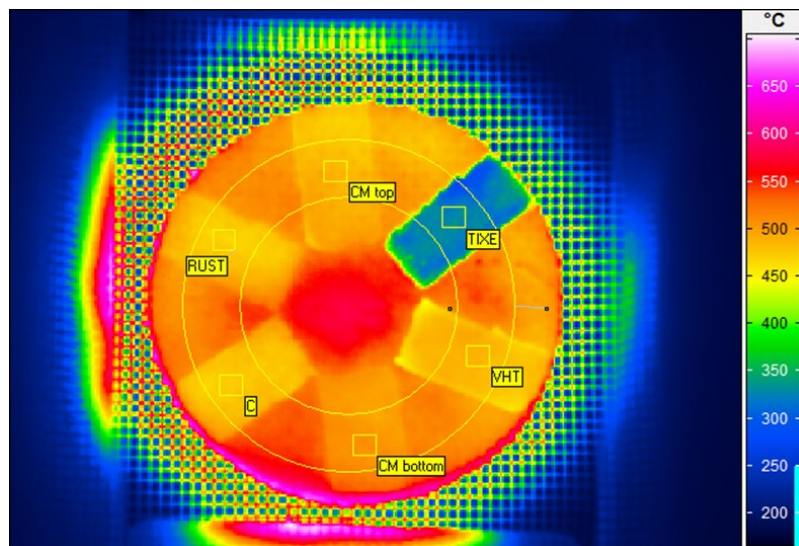


Figura 28. Ritaglio aree verniciate

Dai valori dei gradienti calcolati sul supporto è stato possibile produrre il grafico del loro andamento nel tempo. In figura 28 si può osservare come nella fase di salita il gradiente massimo sia ha per R5-R4 ed è di 50°C circa, tra 120'' e 180'' il gas viene chiuso e la fiamma si spegne lentamente e da 200'' in poi i gradienti sono molto bassi indice di un raffreddamento omogeneo. I valori dei gradienti sono stati poi sottratti ai valori medi di temperatura delle zone verniciate ottenendo così il grafico dell'andamento della temperatura delle cinque vernici rispetto al tempo (figura 29).

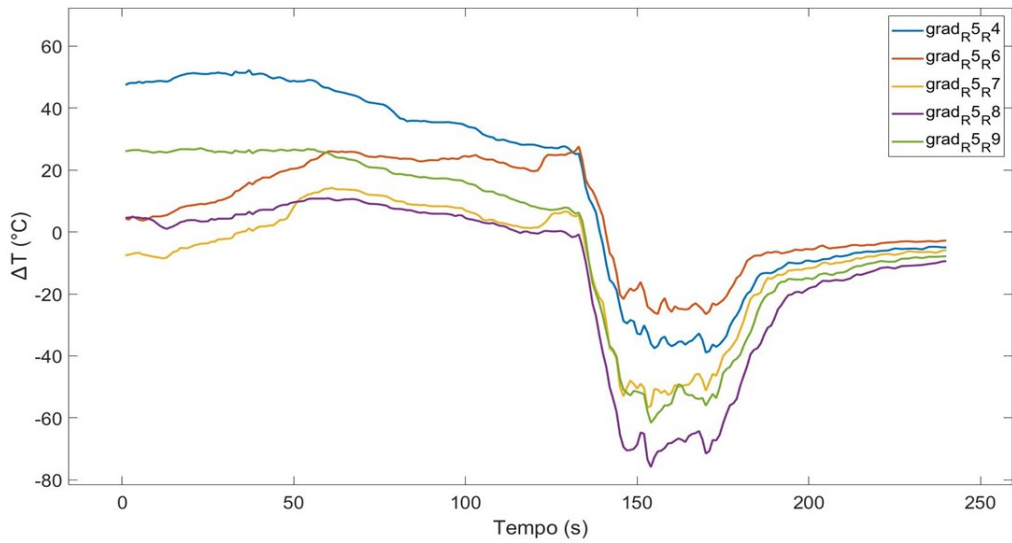


Figura 29. Andamento gradienti

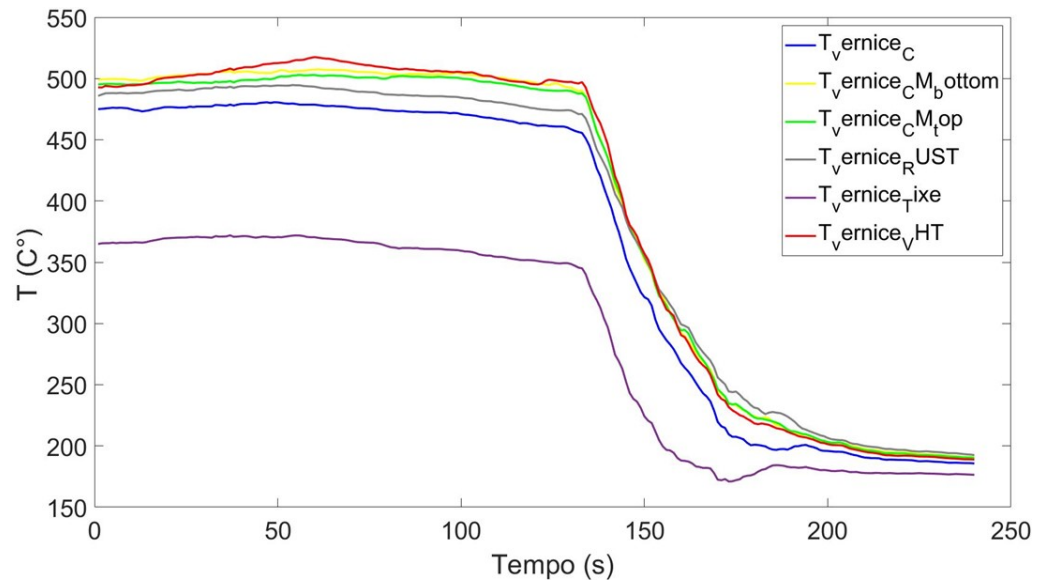


Figura 30. Grafico temperatura tempo delle vernici.

In fine, prendendo come riferimento la vernice CM per via delle migliori proprietà fisico-chimiche (tabella 3), la legge di Stephan- Boltzmann per i corpi grigi consente di correggere la temperatura della vernice di riferimento “CM” e di calcolare l’emissività di tutte le vernici.

I valori di emissività così ottenuti sono riportati nel grafico in figura 30 che rappresenta la variazione dell’emissività delle 4 vernici esaminate, rispetto alla vernice CM, al variare della temperatura.

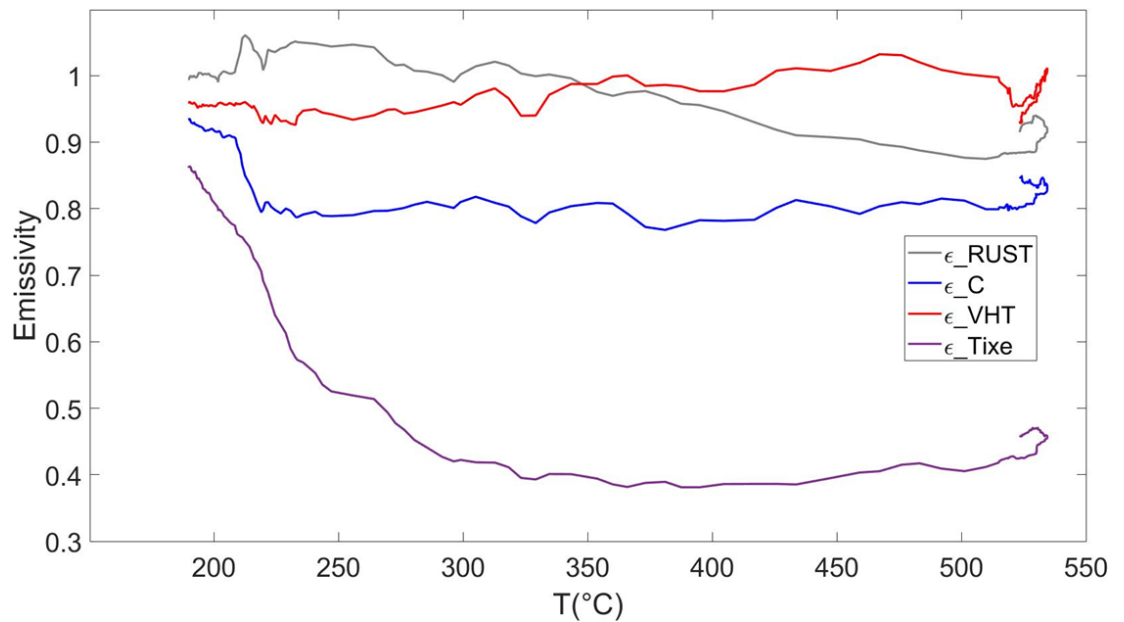


Figura 31. Grafico emissività vernici rispetto alla temperatura

Nel grafico si può osservare che:

- Sia la curva RUST che VHT presentano picchi al di sopra del valore limite 1 ($\epsilon \leq 1$, vedi sottoparagrafo 2.3.1) indice di un errore nella misurazione.
- La curva Tixe ad alte temperature ha valori di emissività bassi, di conseguenza, non è una vernice alto emissiva.

Nome vernice	RUST	IE-Coat 840-C	VHT SPB102	TERMOTIX
T_{max}	750°C	1093°C	1093°C	650°C
Fornitore	Rawlins Paints(UK)	AREMCO	VHT	TIXE(IT)
Costo	13 €	213 €	31 €	20 €
Messa in opera	24h a T _{amb}	24h a T _{amb}	24h a T _{amb}	24h a T _{amb}
Emissività massima	$\epsilon = 1.04$ a 220°C	$\epsilon = 0.94$ a 200°C	$\epsilon = 1.02$ a 475°C	$\epsilon = 0.85$ a 200°C

Tabella 4. Caratterizzazione di vernici alto emissive

6. CONCLUSIONI

Si vuole, con questo studio, caratterizzare l'emissività di alcune vernici commerciali, classificate come alto-emissive, (Tabella 3) e conseguentemente individuare la vernice che più si adatta alle necessità dell'impiego.

Individuare la vernice più adeguata è indispensabile per poter valutare l'efficacia e l'affidabilità del forno a microonde, nel portare materiali (ceramici, metallici) ad elevate temperature.

L'efficacia e l'affidabilità del forno a microonde vengono valutate stimando la temperatura raggiunta all'interno del forno e sul materiale in cottura, attraverso l'utilizzo di sistemi non a contatto (termocamere o pirometri). Tali sistemi sono meno invasivi e meno soggetti al surriscaldamento ma necessitano di essere tarati con il valore corretto di emissività del corpo in esame.

I valori di emissività, indispensabili per la taratura, posso essere determinati rivestendo il tubo ceramico, utilizzato per il trasporto del materiale in cottura, con una vernice alto emissiva.

Quest'ultima è stata individuata caratterizzando l'emissività di quattro vernici commerciali alto emissive e confrontando i loro prezzi a parità di prestazioni.

Dopo una accurata analisi dello stato dell'arte, il metodo radiometrico diretto è risultato il più adeguato nel calcolo dell'emissività delle vernici in esame.

Tale metodo è più adatto sia per quanto riguarda il campo di applicazione (elevate temperature e lunghezze d'onda) che per il risultato fornito (ϵ_{tot}), lo stesso non si può dire dei metodi radiometrici indiretti e dei metodi calorimetrici diretti (cap. 3).

I risultati emersi dal lavoro svolto in laboratorio, sono stati modellati nel grafico di figura 30 e successivamente inseriti nella tabella 4.

La vernice "VHT" e la vernice "RUST", con un costo contenuto, hanno prestazioni elevate in termini di emissività e temperatura massima raggiungibile, ma il valore di emissività di entrambe supera il valore limite uno ($\epsilon \leq 1$).

In conclusione, dal grafico della figura 30 si evincono errori di misurazione e questo ci suggerisce che il set-up deve essere ottimizzato.

A tale scopo si potrebbe posizionare i mattoni refrattari in modo tale da evitare l'irraggiamento del provino (figura 32) e garantire maggiore stabilità della fiamma del Becco Bunsen.

Infine, si potrebbe posizionare la termocamera ad una migliore angolazione rispetto al provino.

Come spiegato nel paragrafo 5.1 angoli tra 5° e 60° offrono un buon compromesso, ma nonostante l'angolazione nel set-up (figura 23) rientri in questo intervallo lo strumento non ci restituisce dati esatti. Infatti, la norma per

la scelta dell'angolazione è di carattere generale ciò impone un approccio sperimentale nella determinazione di tale parametro.

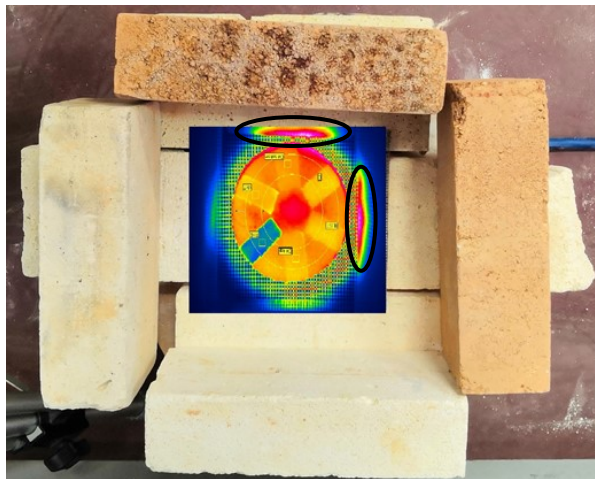


Figura 32. Irraggiamento provino

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] wikipedia. [Online]. Available:
https://it.wikipedia.org/wiki/Secondo_principio_della_termodinamica#:~:text=Il%20secondo%20principio%20della%20termodinamica%20possiede%20diverse%20formulazioni%20equivalenti%2C%20delle,aumentare%20nel%20tempo%2C%20finch%C3%A9%20l%27.
- [2] G. Roche, La termografia per l'edilizia e l'industria. Manuale, Maggioli , 2012.
- [3] [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Lunghezza_d%27onda.
- [4] [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Legge_di_Planck.
- [5] FLIR, 21 Settembre 2009. [Online]. Available:
<https://manualzz.com/doc/5662102/manuale-dell-utente-flir-reporter>.
- [6] [Online]. Available:
<http://fisicategnica.pbworks.com/w/page/13977816/09%20Irraggiamento%201>.
- [7] «Wikipedia,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Resistenza_elettrica.
- [8] E. O. Doebelin, Strumenti e metodi di misura, McGraw-Hill, 2008.
- [9] «Wikipedia,» [Online]. Available: <https://it.wikipedia.org/wiki/Termoresistenza>.
- [10] WIKA, 2014. [Online]. Available: https://de-de.wika.de/upload/DS_IN0029_it_it_62002.pdf.
- [11] «Metrologia della temperatura,» [Online]. Available:
http://oldsite.inrim.it/ldm/cd_ldm/allegati/SI_temperatura/metrologiatemperatura.pdf.
- [12] [Online]. Available: http://www.deltabeta.it/portale/tesine/Sensori_temperatura.pdf.
- [13] «Wikipedia,» [Online]. Available: <https://it.wikipedia.org/wiki/Termografia>.
- [14] G. Roche, La termografia per l'edilizia e l'industria., Maggioli, 2012.
- [15] Tesco, «Guida tascabile sulla Termografia,» 2008. [Online]. Available:
https://www.google.it/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwic7ruZqaDpAhUpNOwKSHiB-IQFjAAegQIARAB&url=http%3A%2F%2Fwww.ingegneria.it%2Findex.php%2Fdownload%2Fdidattica%2Fdownload%2F976_3683ea9c481c818c48918a0be4a16820&usg=AOvVaw3TpWG8WT2MdK.
- [16] L. M. H. a. K. A. Snail, «Integrating Spheres for Mid- and Near-infrared Reflection,» 2002.
- [17] [Online]. Available: https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/risparmio-energia-settore-civile/rds-147.pdf.
- [18] D. I. A. Muscio. [Online]. Available:
<https://www.google.it/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwjnoJOurqHpAhWwsaQKHTvTDvMQFjAAegQIBRAB&url=http%3A%2F%2Fwww.eelab.unimore.it%2Fsite%2Fhome%2Feventi%2Fdocumento75010149.html&usg=AOvVaw0g9IMcnpNbuAhtIN3ZI-kU>.
- [19] [Online]. Available: <https://www.termografiatop.it/termografia-come-determinare-emissiva-materiale/>.

- [20] [Online]. Available: <https://termocamerafacile.com/emissivita-e-temperatura-riflessa-come-e-perche-misurarle/>.
- [21] D. D. Y.S. Touloukian, «Thermal radiative properties: metallic elements and alloys».
- [22] D. D. Y.S. Touloukian, «Thermal radiative properties. Non-metallic solids».
- [23] P. E. M. a. A. W. J.M Jones, «A COMPILATION OF DATA ON THE RADIANT EMISSIVITY OF SOME,» 2018.
- [24] «flirmedia,» 2011. [Online]. Available: http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820325/T820325_IT.pdf.

8. FIGURE DI RIFERIMENTO

Fig. 1:

<http://www.piccolominisiena.it/formazione/formazione2010/siti2010/4B2010/Psico-Lillo/cosasonoicolori.htm>

Fig. 2:

<http://fisicatecnica.pbworks.com/w/page/13977816/09%20Irraggiamento%20>

Fig. 3:

<http://fisicatecnica.pbworks.com/w/page/13977816/09%20Irraggiamento%20>

Tab. 1: http://www.fisicatecnica.altervista.org/tabelle/tab_emissiv.htm

Fig. 4:

<https://areeweb.polito.it/didattica/corsiddc/03MOA/Tesine/Cavo13/LezioneG1.pdf>

Fig. 5: https://it.wikipedia.org/wiki/Ponte_di_Wheatstone

Fig. 6:

<http://people.na.infn.it/~paolucci/documenti/dcs/SensoridiTemperatura.pdf>

Fig. 7: https://it.wikipedia.org/wiki/Effetto_Seebeck

Fig. 8: http://laboratorioscolastico.altervista.org/it_IT/sulla-misura-della-temperatura/

Fig. 9: <https://mechatronicsly.com/it/elettronica/sensori-di-temperatura-le-termocoppie/>

Fig. 10:

[http://www.docente.unicas.it/useruploads/000356/files/le_misure_di_temperatura_\(slide\).pdf](http://www.docente.unicas.it/useruploads/000356/files/le_misure_di_temperatura_(slide).pdf)

Fig. 11:

<https://www.emp.it/media/scheda/264/Note%20Tecniche%20Termocoppie.pdf>

Fig. 12: http://www.deltabeta.it/portale/tesine/Sensori_temperatura.pdf

Fig. 13: http://www.deltabeta.it/portale/tesine/Sensori_temperatura.pdf

Fig. 14: <http://www.rancanelettrotecnica.it/analisi-termografica-come-strumento-di-analisi-predittiva/>

Fig. : <https://it.wikipedia.org/wiki/Termografia>

Fig. : <https://www.pce-italia.it/html/dati-tecnici-1/link/pce-tc-31-immagini-termiche.htm>

Fig 15: <https://darkwavethermo.com/2015/06/14/analisi-termografiche-tubazioni-acqua-e-riscaldamento/>

Fig. 16: <https://www.medicalexpo.it/prod/jasco/product-84943-551555.html>

Fig. 17: <http://www.iuav.it/SISTEMA-DE/Laboratori4/strumentaz/analisi-te/emissometr/index.htm>

Fig. 18: <https://www.jenoptik.com/products/cameras-and-imaging-modules/thermographic-camera/stationary-infrared-camera>

Fig. 19-20-21-22

:<http://eprints.whiterose.ac.uk/133266/7/emissivity%20manuscript%20revision%20%28final%29.pdf>

Fig. 23: <https://www.chimica-online.it/download/becco-bunsen.htm>