



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**CARATTERIZZAZIONE DELL'EMISSIVITÀ DI VERNICI ALTO-EMISSIVE SU SUPPORTI
CERAMICI IN FUNZIONE DELLO SPESSORE E DELLA TEMPERATURA**

**CHARACTERIZATION OF THE EMISSIVITY OF HIGH-EMISSIVITY PAINTS ON
CERAMIC SUBSTRATES AS A FUNCTION OF THICKNESS AND TEMPERATURE**

Relatore: Chiar.mo

Prof. **Gian Marco Revel**

Correlatore: Chiar.ma

Rachele Napolitano

Tesi di Laurea di:

Dionigi Micolucci

A.A. 2020/ 2021

*Ai miei nonni.
In particolare,
a nonno Giovannino,
le telefonate prima degli
esami mi hanno dato il
coraggio per affrontarli,
quelle subito dopo,
piene di gioia per i miei
traguardi, mi hanno
riempito di orgoglio verso
me stesso;
il miglior carburante
per poter andare avanti.
Vi voglio bene.*

Sommario

1.	Introduzione	3
1.1	Obiettivo della Tesi	3
2.	Trasmissione del calore.....	4
2.1	Conduzione.....	4
2.2	Convezione	6
2.3	Irraggiamento	7
2.3.1	Onde elettromagnetiche	8
2.3.2	Comportamento delle superfici	9
2.3.3	Corpo nero	11
2.3.4	Corpi reali	13
3.	Metodi per la misura della temperatura	15
3.1	Termometri ad espansione	15
3.1.1	Termometri bimetallici	15
3.1.2	Termometri a liquido	16
3.1.3	Termometri a pressione	17
3.2	Termometri termoelettrici e a resistenza	18
3.3	Termometri ad irraggiamento.....	21
4.	Metodi per la misura di emissività	25
4.1	Metodi indiretti per il calcolo dell'emissività	25
4.2	Metodi diretti per il calcolo dell'emissività	25
5.	Applicazioni delle vernici alto-emissive	27
6.	Fase sperimentale.....	29
6.1	Caratterizzazione dello spessore delle vernici.....	29
6.1.1	Vernici di riferimento utilizzate.....	29
6.1.2	Metodi di deposizione	31
6.1	Caratterizzazione di polveri ceramiche ad alte temperature	33
6.2.1	Descrizione del setup e della strumentazione utilizzata	34
6.2	Acquisizione dei dati	37
6.3	Elaborazione dei dati	39
7.	Risultati e discussione.....	42

7.1	Risultati relativi alla caratterizzazione dello spessore delle vernici	42
7.2	Risultati relativi alla caratterizzazione dell'emissività dei pigmenti ceramici	44
8.	Conclusione	49
	Bibliografia	50

1. Introduzione

Nell'ambito dell'ingegneria industriale abbiamo spesso a che fare con processi tecnologici che avvengono ad elevate temperature. Pertanto, negli anni sono state migliorate le proprietà termo-meccaniche di materiali come l'acciaio al fine di resistere al meglio a queste temperature estreme. Tuttavia, nonostante le ottime proprietà di tali materiali, con l'utilizzo prolungato subiscono comunque gli effetti dell'usura e dello stress termico tra i vari cicli di lavoro. Essendo spesso leghe speciali dagli elevati costi di produzione, nasce l'esigenza di proteggere i componenti costituiti da tali leghe per prolungarne ulteriormente la vita utile e abbattere in questo modo i costi di manutenzione degli impianti.

In quest'ottica sono state create vernici speciali dette *alto emissive*, le quali, oltre ad avere ottime proprietà meccaniche, grazie alla loro elevata emissività hanno un'ottima resistenza alle alte temperature e fanno da "scudo" ai materiali che rivestono, disperdendo calore dalla superficie tramite irraggiamento.

1.1 Obiettivo della Tesi

L'emissività, e dunque la sua caratterizzazione, rappresentano un argomento ancora molto studiato e aperto, per via dei molti fattori che ne influenzano la misurazione e l'incertezza della misura, tra cui le proprietà dei materiali, le condizioni ambientali, il set-up sperimentale e la strumentazione.

In questa tesi ci concentreremo in particolare sulla relazione che lega l'emissività di una vernice alto-emissiva alla temperatura e allo spessore dello strato.

Lo studio sarà suddiviso in due parti. La prima parte sarà costituita da una ricerca bibliografica, per trovare risultati nella letteratura scientifica riguardo ai metodi di misura adottati per la caratterizzazione dell'emissività. Questa prima parte risulta essere propedeutica per la seconda in quanto ci permette di trovare riferimenti riguardo la relazione fra emissività e spessore e ci permette di capire quali sono le problematiche legate alla sua caratterizzazione ad elevate temperature.

La seconda parte sarà costituita da un lavoro di laboratorio, in cui svilupperemo un set-up sperimentale che ci permetterà, mediante l'utilizzo di uno spessimetro di individuare il metodo di deposizione delle vernici più adatto. Lo scopo principale è quello di garantire un'accurata misurazione dell'emissività, evitando possibili cause di inaccuratezza dovute ad esempio all'irraggiamento del supporto o all'applicazione disomogenea della vernice. Una volta garantita la corretta deposizione della vernice, questa verrà utilizzata come riferimento per la caratterizzazione dell'emissività di alcuni pigmenti ceramici in funzione della temperatura.

2. Trasmissione del calore

Prima di procedere con la parte sperimentale di questa trattazione è bene richiamare la teoria della trasmissione del calore per poi orientarci verso la trasmissione di calore per irraggiamento ed introdurre i concetti di *corpo nero* e di *emissività*, concetti chiave di tutta la tesi.

La trasmissione del calore è, in fisica, un flusso di energia che scaturisce da una differenza di temperatura. In particolare, il *secondo principio della termodinamica* afferma che tale flusso avviene nella direzione delle temperature decrescenti.

Esistono tre modalità di trasmissione del calore:

- conduzione;
- convezione;
- irraggiamento.

2.1 Conduzione

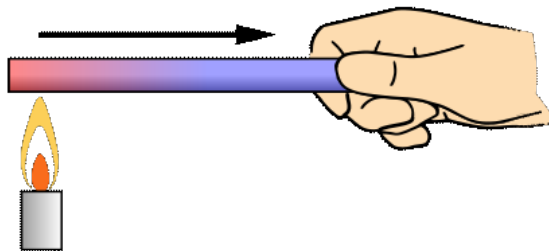


Figura 1- Trasmissione di calore su barretta di metallo

La prima modalità di trasmissione di calore che analizziamo è la trasmissione per **conduzione**.

Questa modalità interessa tutti e tre gli stati della materia, solido, liquido o aeriforme ed è quella a cui assistiamo, per esempio, quando riscaldiamo l'estremità di una barra di metallo e dopo poco abbiamo che la temperatura dell'altra estremità aumenta.

Possiamo spiegare tale fenomeno dando un'occhiata a cosa accade a livello microscopico.

Qualsiasi corpo, che si trova a temperatura maggiore dello zero assoluto, presenta atomi che, se il corpo è liquido o aeriforme, si muovono in tutte le direzioni, mentre se il corpo è solido oscillano nel reticolo in misura proporzionale alla loro temperatura, più la temperatura è elevata, più gli atomi risultano eccitati e oscillano.

Questo implica che, presa una barretta di metallo, se poniamo una estremità su una fiamma, gli atomi presenti in quella estremità incominceranno ad oscillare in modo maggiore rispetto agli altri atomi della barretta. Tali atomi allora urteranno gli atomi adiacenti, i quali, per la conservazione della quantità di moto, aumenteranno la loro oscillazione. In questa maniera l'energia della fiamma si propaga grazie agli urti tra gli atomi a tutta la sbarretta.

A livello analitico, la legge che descrive questo fenomeno è il **Postulato di Fourier**:

$$q = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

- A: Area della sezione ortogonale alla direzione di propagazione del calore [m^2];
- λ : Conducibilità termica $\left[\frac{W}{mK}\right]$. Definita come il flusso termico che si trasmette attraverso uno spessore unitario di materiale per unità di superficie e per una differenza di temperatura unitaria;
- $\frac{dT}{dx}$: Gradiente di temperatura nella direzione di propagazione del calore. È negativo in quanto il calore fluisce da zone a temperatura maggiore a zone a temperatura minore, pertanto è necessario introdurre il segno - per avere il flusso termico positivo nella direzione considerata, ovvero quella x.

Questa espressione è valida sotto alcune ipotesi: quella di avere uno stato stazionario, un mezzo omogeneo ed isotropo e uno scambio termico monodimensionale (nel nostro caso nella direzione x).

Facciamo qualche precisazione sulla **conducibilità termica**.

La conducibilità termica è una proprietà del materiale che descrive l'attitudine di quest'ultimo a trasmettere il calore. Non è dunque un valore fisso, ma dipende dallo stato del materiale e può variare con la temperatura, la pressione e gli eventuali trattamenti termici che il materiale ha subito. Chiamiamo **conduttori** materiali con elevata conducibilità termica (es. rame: $390 \left[\frac{W}{mK}\right]$), mentre chiamiamo **isolanti** materiali con bassa conducibilità termica (es. polistirolo estruso: $0,040 \left[\frac{W}{mK}\right]$).

2.2 Convezione

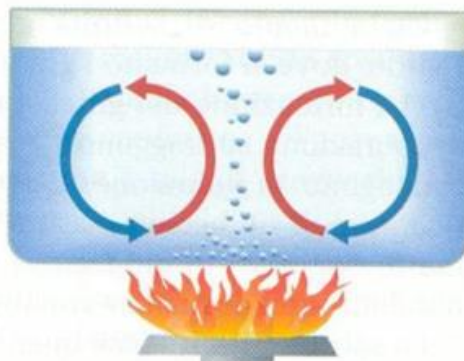


Figura 2 - esempio di moti convettivi

La seconda modalità con cui si trasmette il calore è detta per **convezione** ed è tipica dei fluidi (con viscosità non troppo elevata).

La peculiarità di questa modalità sta nel fatto che abbiamo, oltre a trasporto di energia, anche trasporto di massa.

Possiamo distinguere due tipologie di convezione:

- Convezione **naturale**: in questo caso il moto convettivo si innesca spontaneamente quando il fluido (ad esempio l'acqua in una pentola posta sul fornello) a contatto con una superficie a temperatura maggiore si scalda per conduzione, scaldandosi, la sua densità diminuisce e dunque, per le spinte di galleggiamento sale verso l'alto. Salendo cede calore al fluido più freddo che incontra e si raffredda, aumentando nuovamente la sua densità e scendendo verso il basso per gravità.
- Convezione **forzata**: si ha quando, tramite dispositivi esterni come ventilatori, pompe e simili viene indotto il moto del fluido verso superfici riscaldate, a contatto con le quali si riscalderà per conduzione. Si ricorre alla convezione forzata qualora non vi siano i presupposti per far sì che si inneschi la circolazione naturale.

Anche in questo caso abbiamo una legge che descrive analiticamente il flusso termico, questa legge prende il nome di **legge di Newton**:

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

- A: Area della superficie interessata allo scambio termico [m^2];
- h: Coefficiente di trasmissione del calore per convezione [$\frac{W}{m^2K}$];

È un parametro determinato sperimentalmente che tiene conto dei fattori che influenzano la convezione, come la geometria della superficie, la natura del moto, le proprietà e la velocità del fluido;

- T_s : Temperatura della superficie [K];
- T_∞ : Temperatura del fluido a distanza sufficientemente grande dalla superficie [K].

Il valore del **coefficiente di trasmissione per convezione** definisce il tipo di convezione, come riportato nella seguente tabella:

VALORE DEL COEFFICIENTE h	TIPO DI CONVEZIONE
2 ÷ 25	Convezione naturale dei gas
10 ÷ 1000	Convezione naturale dei liquidi
25 ÷ 250	Convezione forzata dei gas
50 ÷ 20 000	Convezione forzata dei liquidi
2 500 ÷ 100 000	Ebollizione e condensazione

Figura 3 - valori tipici del coefficiente di scambio termico per convezione

2.3 Irraggiamento

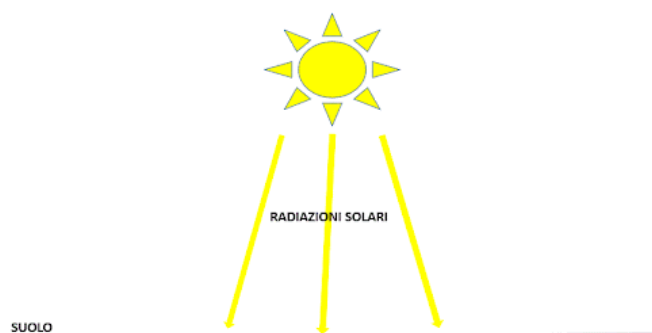


Figura 4 - un esempio di irraggiamento è quello solare

Il terzo ed ultimo modo in cui il calore si trasmette (che è quello che più ci riguarderà nel corso della trattazione) è l'**irraggiamento**.

L'irraggiamento consiste nell'emissione di energia sottoforma di onde elettromagnetiche, il che è notevole, in quanto questo significa che la propagazione di tale energia avviene anche in assenza di un mezzo materiale (dunque nel vuoto) e avviene alla velocità della luce.

Nel caso della trasmissione di calore parleremo di **irraggiamento termico**.

Ogni corpo che abbia una temperatura maggiore dello zero assoluto emette radiazione termica.

Prima di proseguire è bene richiamare qualche nozione sulle onde elettromagnetiche.

2.3.1 Onde elettromagnetiche

Le **onde elettromagnetiche** sono costituite da oscillazioni sincronizzate di campi elettrici e magnetici. Nei mezzi isotropi e omogenei le oscillazioni dei due campi sono perpendicolari fra loro e alla direzione di propagazione dell'onda, il che le connota come onde trasversali.

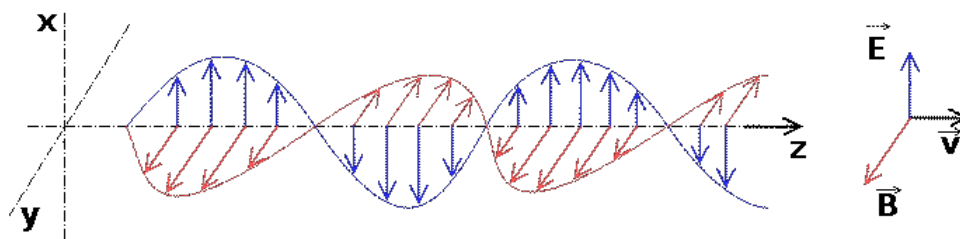


Figura 5 - onda elettromagnetica che si propaga nel vuoto

Le grandezze che definiscono le onde elettromagnetiche sono:

- **Lunghezza d'onda (λ)**: è la distanza che intercorre tra due punti aventi la stessa fase sull'onda;
- **Frequenza (ν)**: è il numero di oscillazioni nell'unità di tempo.

Viene da sé che esistono diversi tipi di onde elettromagnetiche, identificate in base alla loro frequenza e alla loro lunghezza d'onda. L'insieme di tutte le possibili frequenze dell'onda elettromagnetica viene detto **spettro elettromagnetico**:

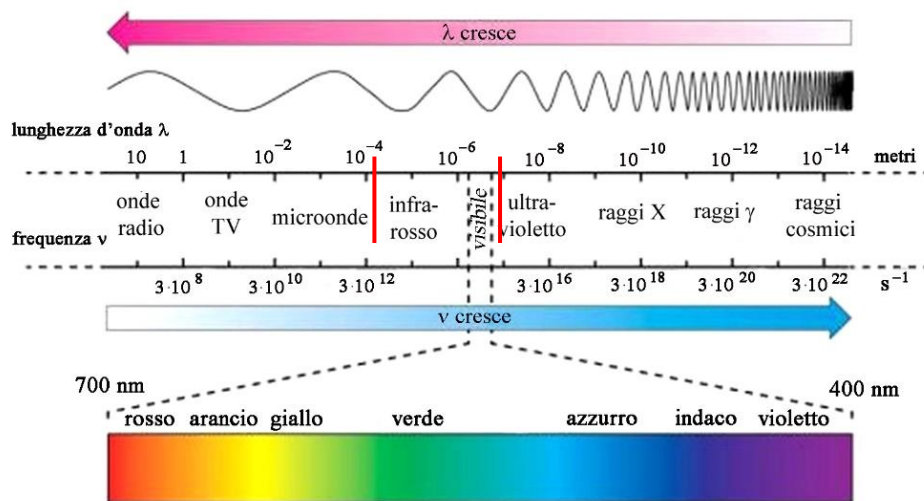


Figura 6 - spettro elettromagnetico, le linee rosse indicano il campo della radiazione termica

Ovviamente in base alle caratteristiche dell'onda cambia il modo in cui questa si comporta interagendo con la materia: onde con elevata lunghezza d'onda (dunque bassa frequenza) possiedono bassa energia e sono poco penetranti rispetto alla materia, mentre onde ad elevata frequenza possiedono maggior energia e risultano molto penetranti, fino a diventare (nel caso di raggi X e raggi gamma) pericolose per gli organismi viventi, compreso l'essere umano.

Dallo spettro si nota come tutta la luce visibile sia racchiusa in un piccolo intervallo di lunghezze d'onda, a sua volta questo è contenuto in un intervallo, che va all'incirca da $10^{-7}m$ a $10^{-4}m$ che è il campo della **radiazione termica**, il quale comprende tutto l'infrarosso e parte dell'ultravioletto.

2.3.2 Comportamento delle superfici

Una radiazione che incide su una superficie si scompone in tre parti:

- Radiazione **riflessa**;
- Radiazione **assorbita**;
- Radiazione **trasmessa**.

Per quanto riguarda la **radiazione riflessa**, sono possibili diversi casi, dipendenti dalla natura della superficie:

- **Radiazione riflessa speculare** (a): si ha quando la radiazione viene riflessa con angolo di riflessione rispetto alla normale pari a quello di incidenza;
- **Radiazione riflessa irregolare** (b): si ha quando la radiazione riflessa varia in direzione e intensità rispetto a quella incidente;
- **Radiazione riflessa diffusa** (c): si ha quando la radiazione riflessa si ripartisce uniformemente in tutte le direzioni.

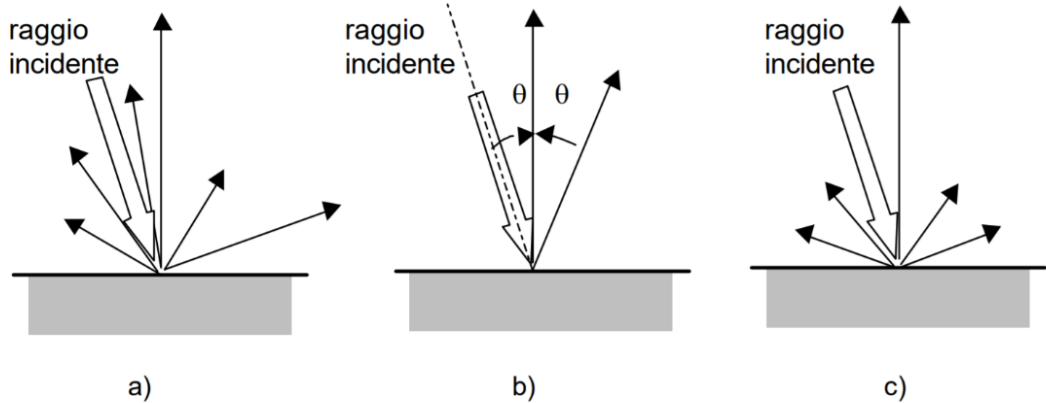


Figura 7 - i tre tipi di radiazione riflessa

Per quanto concerne la radiazione trasmessa, questa subisce, nell'attraversare il corpo, una variazione di inclinazione rispetto alla normale. Tale variazione è definita dalla **Legge di Snell**:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_r}{\sin \theta_i} \quad (2.3)$$

Dove:

- n_1 : indice di rifrazione del mezzo 1;
- n_2 : indice di rifrazione del mezzo 2;
- θ_r : angolo di rifrazione;
- θ_i : angolo di incidenza.

A tutte e tre le parti in cui si scompone la radiazione incidente possiamo associare un coefficiente:

- Coefficiente di riflessione (**r**);
- Coefficiente di assorbimento (**a**);
- Coefficiente di trasparenza (**t**).

È possibile sfruttare tali coefficienti per definire un bilancio energetico della radiazione incidente, in quanto la somma dell'energia contenuta nei tre raggi in cui essa si scompone dev'essere pari all'energia totale della radiazione di partenza. Tale bilancio si può scrivere come:

$$1 = r + a + t \quad (2.4)$$

Questo bilancio è utile per andare a definire diverse categorie di **corpi reali**:

- **Corpi trasparenti**: sono i corpi nei quali la radiazione incidente viene completamente trasmessa. Avremo dunque che il coefficiente di assorbimento e quello di riflessione sono entrambi nulli e il bilancio assume la forma:

$$t = 1 \quad (2.4.1)$$

- **Corpi semitrasparenti:** sono i corpi in cui solo parte della radiazione incidente viene trasmessa, la restante parte si suddivide in radiazione assorbita e riflessa. Il bilancio in questo caso appare nella sua versione completa.
- **Corpi opachi:** sono corpi che non permettono la trasmissione della radiazione, ma solo assorbimento e riflessione. Il bilancio diventa, in questo caso:

$$a + r = 1 \quad (2.4.2)$$

In tutti questi casi i coefficienti che abbiamo considerato sono funzione della lunghezza d'onda della radiazione incidente. È possibile fare una semplificazione andando a considerare un particolare corpo opaco in cui consideriamo costante il coefficiente di assorbimento, tale corpo è chiamato **corpo grigio**.

Studiare i meccanismi di scambio termico per irraggiamento dei corpi reali risulta molto complesso, per questo motivo è stato introdotto il concetto di **corpo nero**.

2.3.3 Corpo nero

Il **corpo nero** è un corpo **ideale**, un modello che sfruttiamo per lo studio dello scambio termico per irraggiamento dei corpi reali. Tale corpo è capace di assorbire l'intera radiazione incidente a qualsiasi lunghezza d'onda e, a parità di temperatura e lunghezza d'onda emette più energia di qualsiasi altro corpo, e lo fa in modo uniforme per tutte le direzioni. Tutto ciò lo connota come assorbitore perfetto ed emettitore perfetto. Una buona approssimazione di un corpo nero è rappresentata da una cavità irregolare con un foro di diametro molto minore del diametro medio della cavità stessa.

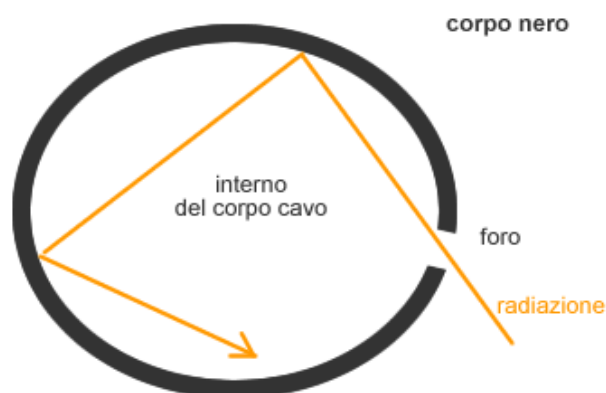


Figura 8 - esempio di corpo nero

Grazie all'introduzione del corpo nero sono state formulate leggi i cui risultati ci permettono di studiare anche i corpi reali. Tra questi risultati abbiamo:

-LEGGE DI PLANCK

Questa legge descrive l'emissione di un corpo nero, infatti esprime **l'emittanza spettrale specifica emisferica** (emisferica in quanto riferita all'energia emessa dalla superficie piana di una semisfera) in funzione della lunghezza d'onda e della temperatura.

$$W(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left[e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)} - 1 \right]^{-1} \quad \left[\frac{W}{\mu m \cdot m^2} \right] \quad (2.5)$$

Con:

- h : Costante di Planck ($6,6 \cdot 10^{-34} J \cdot s$);
- c : Velocità della luce ($299792458 \frac{m}{s}$);
- k : Costante di Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$).

Presi diversi valori di T, è possibile, grazie a questa legge, tracciare l'andamento dell'emittanza di un corpo nero in funzione della lunghezza d'onda, ottenendo un grafico di questo tipo:

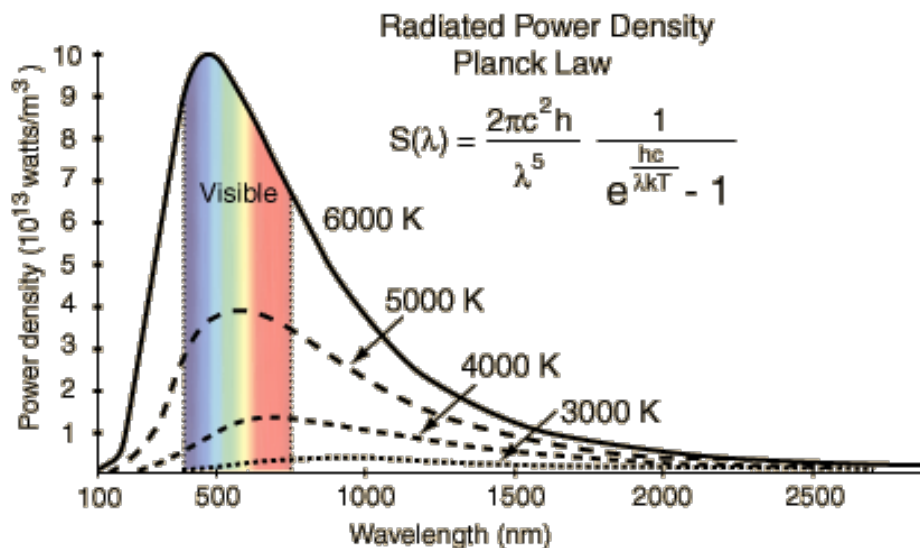


Figura 9 - emittanza spettrale in funzione della lunghezza d'onda

Dal grafico si nota come il max dell'emittanza, al crescere della temperatura si sposta verso lunghezze d'onda minori, fino ad arrivare nel campo del visibile.

Ciò è dimostrabile andando a derivare la legge di Planck e ottenendo la **legge di Wien**.

-LEGGE DI WIEN

Questa legge stabilisce la relazione tra la T del corpo nero e la λ in corrispondenza del max di emissione:

$$\lambda_{max}T = b \quad [m \cdot K] \quad (2.6)$$

Con **b**: costante di Wien ($2,897 \cdot 10^{-3} m \cdot K$)

Come ci aspettavamo, al crescere di T abbiamo la diminuzione di λ_{max} . La legge di Planck, oltre ad essere derivabile, è anche integrabile e dal suo integrale ricaviamo un'altra legge fondamentale per il corpo nero:

-LEGGE DI STEFAN-BOLTZMANN

Integrando la legge di Planck su tutto il campo di lunghezze d'onda otteniamo l'**emittanza globale** del corpo nero in funzione della temperatura:

$$W(T) = \int_0^{\infty} W(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 = J_0 \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (2.7)$$

Dove σ è la **costante di Stefan-Boltzmann** ($5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$)

2.3.4 Corpi reali

Con il concetto di corpo nero abbiamo trascurato numerosi fattori che nella realtà riducono l'emittanza effettiva del corpo. Ecco perché un corpo reale ad una data temperatura avrà sempre un'emittanza minore di quella del corpo nero alla stessa temperatura.

Possiamo pertanto definire un coefficiente adimensionale grazie al quale poter calcolare l'emittanza di un corpo reale semplicemente conoscendo quella del corpo nero alla stessa temperatura. Stiamo parlando dell'**emissività**:

$$\varepsilon = \frac{J}{J_0} \quad (2.8)$$

Dove con **J** indichiamo l'emittanza del corpo reale.

L'emissività di un corpo reale dipende da vari fattori, come **temperatura**, composizione, ruvidità della superficie e **spessore**. [1]

In questa tesi ci soffermeremo sul caratterizzare lo spessore e le modalità di deposizione di vernici alto emissive, grazie alle quali avremo il riferimento necessario per la caratterizzazione dell'emissività di alcuni pigmenti ceramici in funzione della temperatura.

3. Metodi per la misura della temperatura

Abbiamo parlato delle dinamiche della trasmissione del calore tra i corpi.

È fondamentale, ai fini della trattazione, fare anche un riferimento ai vari metodi di misura della temperatura.

Gli strumenti di misura della temperatura a contatto sono chiamati **termometri** e si suddividono in tre famiglie, a seconda del principio fisico che sfruttano:

- Termometri ad **espansione**;
- Termometri **termoelettrici** e a **resistenza**;
- Termometri a **radiazione**.

3.1 Termometri ad espansione

Sono termometri che sfruttano il principio dell'espansione termica di opportune sostanze presenti al loro interno, a cui è associato uno spostamento come uscita.

Si suddividono in tre sottogruppi:

- Termometri **bimetallici**;
- Termometri **a liquido**;
- Termometri **a pressione**;

3.1.1 Termometri bimetallici

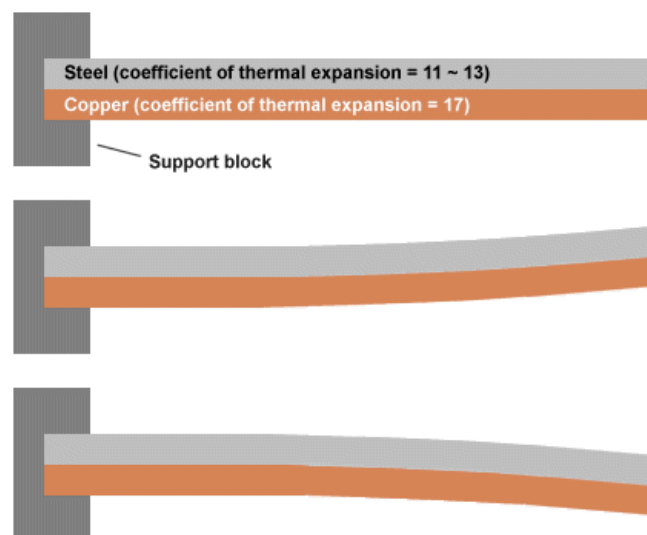


Figura 10 - funzionamento termometro bimetallico

I termometri bimetallici sono strutturalmente i più semplici, costituiti da due lamine metalliche di uguale spessore, ma diverso materiale (dunque con differenti coefficienti di dilatazione termica) incollate tra di loro.

Se sottoposte ad un ΔT queste si incurveranno per via del differente coefficiente di dilatazione, in particolare se $T_2 > T_1$ si incurveranno in un verso, viceversa si incurveranno nel verso opposto.

Il raggio di curvatura è descritto dalla seguente relazione:

$$r \cong \frac{2t}{3(\alpha_A - \alpha_B)(T_2 - T_1)} \quad [m] \quad (2.9)$$

Dove:

- r : raggio di curvatura;
- t : spessore delle lamine;
- α_A : coefficiente di espansione della lamina A;
- α_B : coefficiente di espansione della lamina B;

In realtà questi termometri esistono di diverse forme e spostamenti in uscita:

- Spostamento lineare;
- Spostamento angolare;
- Spostamento elicoidale.

Il **range di temperatura** che possono misurare è: $-70 \div 550$ [°C]

L'**accuratezza** di questi strumenti è: $0,5 \div 1$ [%f.s.]

Per quanto riguarda la **sensibilità** questa è legata alla differenza tra i due coefficienti di dilatazione.

3.1.2 Termometri a liquido

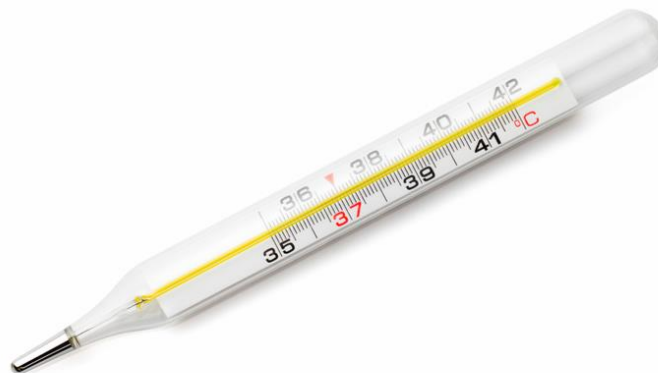


Figura 11 - un comune termometro a liquido

I termometri di vetro a liquido sono i più conosciuti, sfruttano l'espansione del liquido che contengono. Sono costituiti da un **bulbo**, una **scala graduata** e una

camera di espansione. Il liquido più usato per medio-alte temperature è il **mercurio**, ma è limitato nelle basse temperature in quanto solidifica a -39°C .

I liquidi più utilizzati per applicazioni a basse temperature sono **alcool**, **toluolo**, **pentano** e una **miscela di propilene/propano**.

Questi strumenti possono operare in diverse condizioni di immersione (parziale, totale o completa) ma vanno utilizzati concordemente a come sono stati tarati, altrimenti bisogna ricorrere a delle correzioni tramite termometro ausiliario.

Il range di temperatura è: $-200\div 550^{\circ}\text{C}$

La precisione è: $\pm 0,5\%$ f.s.

3.1.3 Termometri a pressione



Figura 12 - termometro a pressione

I termometri a pressione presentano una struttura più complessa. Sono infatti costituiti da un elemento sensibile, il **bulbo**, un elemento di trasmissione, il **capillare**, e un **trasduttore di pressione**, il quale può essere di diversi tipi: **tubo di Bourdon**, **diaframma** o **soffietto**.

Possono presentare al loro interno liquidi, come **mercurio** e **xylene**, i quali in virtù della loro bassa comprimibilità rendono il ΔT dipendente solo dal ΔV , oppure possono contenere **gas** o **vapori**, ma in questo caso la ΔT sarà correlata, tramite la legge di stato dei gas ideali alla pressione.

I termometri che sfruttano il gas sono usati per temperature molto basse, pur mantenendo un'ottima linearità anche a temperature alte. I termometri a liquido hanno spesso bisogno di compensazioni per via della lunghezza del capillare di trasmissione.

Il range di temperatura è:

- Mercurio: $-40\div 590^{\circ}\text{C}$
- Xylene: $-100\div 400^{\circ}\text{C}$

- Gas: -240÷650°C
- La precisione è: ±0,5%f.s.

3.2 Termometri termoelettrici e a resistenza

I termometri termoelettrici vengono più comunemente chiamati **termocoppie**. Sono sensori molto semplici, che trasducono la variazione di temperatura in f.e.m. sfruttando un effetto termoelettrico noto come **effetto Seebeck**.

L'effetto Seebeck, che in realtà combinazione di altri due effetti termoelettrici (**Peltier** e **Thomson**) consiste nella genesi di una forza elettromotrice quando i giunti di un circuito composto da due materiali diversi vengono posti a temperature differenti. Nel circuito circolerà una corrente proporzionale al ΔT .

Possiamo sfruttare questo fenomeno per la misura della temperatura grazie alla relazione che intercorre tra la tensione generata e la temperatura differenziale:

$$dE = \alpha_{AB} dT \quad (2.10)$$

Dove abbiamo indicato con α_{AB} il coefficiente di Seebeck, il quale dipende dai due materiali che compongono il circuito.

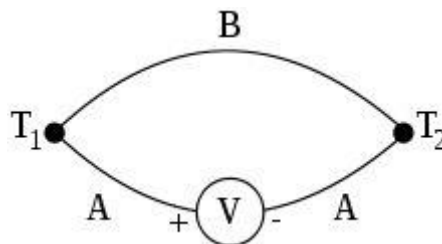


Figura 13 - effetto Seebeck

Le termocoppie sono molto versatili e possono essere costituite da diversi materiali (standardizzati con norme IEC) per cui vengono identificate con una sigla (S, R, E, J, K, T, N, W_3).

In base al tipo di termocoppia abbiamo diverse caratteristiche per quanto riguarda sensibilità, linearità, campo di misura, incertezza e costo.

- R, S: 0÷1450°C ±0,25% lettura;
- K: -200÷1250°C ±0,75% lettura;
- T: -200÷350°C ±0,50% lettura;
- J: 0÷750°C ±1,00% lettura.

Sono differenti anche le curve della f.e.m. generata in funzione della temperatura:

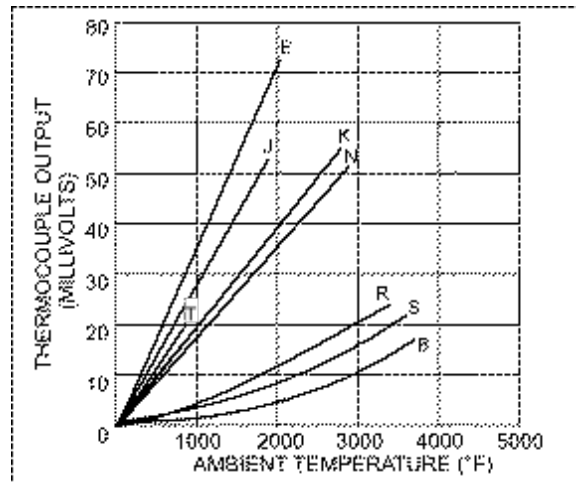


Figura 14 - curve temperatura/f.e.m per le varie termocoppie

Possiamo sfruttare diversi circuiti di misura basati sulle termocoppie:

- Circuito con riferimento in bagno di H_2O +ghiaccio, ottimo per applicazioni di laboratorio, sconsigliato per quelle industriali;
- Circuito con sistema di compensazione della T di riferimento (zero elettronico). Con questo metodo è possibile acquisire più canali di termocoppie; pertanto, è molto utilizzato nei sistemi di acquisizione di dati.
- Termopila: è un circuito costituito da più termocoppie in serie e serve ad avere maggior sensibilità;
- Circuito con termocoppie in parallelo: permette di calcolare la T media tra i giunti, per questo è impiegato nei sistemi di misura della temperatura ambiente.

Le **termoresistenze** (RTD) basano il loro funzionamento sul fatto che la resistenza dei conduttori varia in modo riproducibile con la temperatura, fenomeno che può essere sfruttato per la misura della temperatura.

La relazione tra R e T è indicata dalla norma CEI EN IEC 60751:

- Per $-200 < T < 0^\circ\text{C}$: $R_T = R_0[1 + AT + BT^2 + C(T - 1000)T^3]$;
- Per $0 < T < 850^\circ\text{C}$: $R_T = R_0[1 + AT + BT^2]$.

Con:

- A, B, C: coefficienti dipendenti dal materiale;
- R_0 : resistenza in Ω misurata a 0°C (solitamente 100Ω o 10Ω);
- T: temperatura in $^\circ\text{C}$.

Abbiamo inoltre due classi di tolleranza distinte:

- Classe A: $0,15 + 0,002 |t|$;
- Classe B: $0,3 + 0,002 |t|$

Dove con t abbiamo indicato la temperatura espressa in $^\circ\text{C}$.

I materiali che costituiscono i sensori delle RTD devono possedere alcuni requisiti:

- Caratteristiche elettriche costanti e stabili;

- Relazione R-T riproducibile;
- Elevato coefficiente di temperatura a 100°C;
- Alto punto di fusione;
- Relazione R-T linearizzabile

I materiali che posseggono questi requisiti sono **rame, platino, nickel**.

I sensori possono essere **a filo metallico** o **a film metallico**.

La struttura dei termometri a resistenza è composta da:

- Sensore;
- Cavi;
- Circuito di misura, il quale può essere o un ponte di Wheatstone (sbilanciato o bilanciato, a due o a tre fili), oppure un circuito Volt-Amperometrico a 4 fili.

Un aspetto negativo di questa famiglia di termometri è che il conduttore, se sottoposto a deformazioni, vede l'insorgere di un ΔR interferente, non correlato alla temperatura; pertanto, bisogna prestare particolare attenzione a realizzazione, assemblaggio e montaggio.

Un altro tipo di dispositivi di misura della temperatura basato sulla resistività è quello dei **termistori**. Questi sono termometri a **semiconduttore** realizzati in materiale ceramico composto da ossidi metallici sinterizzati.

Rispetto alle termoresistenze abbiamo maggior sensibilità e una relazione tra R e T di proporzionalità inversa, una relazione fortemente non lineare:

$$R = R_0 e^{\left[\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right]} \quad (2.11)$$

Con:

- R : resistenza a temperatura T ;
- R_0 : resistenza a temperatura T_0 ;
- T : temperatura da misurare;
- T_0 : temperatura di riferimento;
- β : costante che dipende dal materiale.

I vantaggi di questi sensori sono:

- Possono essere di qualsiasi forma;
- Possono essere di qualsiasi dimensione;
- Possono essere così piccoli da avere un'inerzia termica quasi assente, dunque una rapida risposta dinamica;
- Ampio range di misura: -200÷1000°C

Tra gli svantaggi abbiamo che l'elevata resistenza di riferimento porta a problemi di auto surriscaldamento.

Il circuito di misura di questi termometri è solitamente un ponte di Wheatstone a due o a tre fili, bilanciato o sbilanciato.

3.3 Termometri ad irraggiamento

I termometri visti finora misurano la temperatura portandosi a contatto con il corpo da misurare fino ad essere in equilibrio termico con esso. Ciò provoca problemi quando si vogliono misurare **temperature molto elevate**, tra cui la perdita dell'isolamento del sensore e la fusione del sensore stesso.

Pertanto, esistono metodi di **misura senza contatto** utili in caso di:

- elevate temperature;
- misure su oggetti in moto;
- misure in remoto;
- misure su oggetti delicati;
- misure di distribuzione della temperatura su superfici.

Questi dispositivi, comunemente chiamati **pirometri** basano il loro funzionamento sull'irraggiamento, andando a rilevare la radiazione emessa dal corpo di cui voglio misurare la temperatura.

I pirometri possono avere due tipi di sensori:

- **termico**: traduce la potenza irradiata in assorbimento di calore e produce (sfruttando termistori, RTD e termocoppie) un segnale elettrico in uscita. È uno strumento del primo ordine a risposta dinamica lenta ed è sensibile a larghe bande di lunghezza d'onda, è relativamente economico;
- **fotonico**: traduce direttamente la potenza irradiata in uscita elettrica, ha una risposta dinamica veloce, ma è sensibile ad una stretta banda di lunghezze d'onda. È un sensore costoso.

In base alle lunghezze d'onda a cui sono sensibili distinguiamo due tipologie di pirometri:

- **monocromatici**;
- **a banda larga**: in questi pirometri la radiazione emessa a qualsiasi λ viene messa a fuoco sul sensore (con sistema a lenti o a specchi, quest'ultimo conferisce maggior sensibilità), dove il ΔT viene trasdotto in tensione tramite un termistore o una termopila.

Un'ultima classificazione dei pirometri è data dalla disposizione dei sensori:

- **singoli**: misurano la T in un punto specifico;
- **matrici**: misurano la temperatura sull'intera superficie, in questa categoria rientrano le **termocamere**.

Le **termocamere** sono delle telecamere il cui sensore, anziché essere sensibile alla luce visibile è sensibile alla radiazione infrarossa.

Questo strumento è capace di ottenere immagini o riprese termografiche, ovvero acquisisce delle **mappe di temperatura** delle superfici a partire dalla radiazione rilevata.

Possiamo classificare le termocamere in base a diverse caratteristiche.

La prima distinzione da fare è tra:

- Termocamere **radiometriche**: L'immagine è costruita su una matrice di un certo numero di pixel per un certo numero di righe. L'elettronica di questa tipologia di strumento rileva il valore di energia immagazzinata da ogni singolo pixel e genera un'immagine in bianco e nero (o in falsi colori) dell'oggetto osservato; in questo modo è possibile misurare il valore di temperatura assoluto di ogni punto dell'immagine.
- Termocamere **non radiometriche**.

Abbiamo poi una classificazione basata sul **campo spettrale**, ovvero quali lunghezze d'onda vengono rilevate dal sensore:

- **Infrarosso vicino al visibile (VIR)**: è utilizzato per fotografia IR e per eseguire riflettografie (diagnostica dei dipinti);
- **Infrarosso onda corta (SW)**: adatto a misure di temperature elevate, come il monitoraggio della combustione dei forni;
- **Infrarosso medio (MW)**: utilizzato in genere per l'identificazione oggetti o gas, ad esempio in spettrografia o per l'acquisizione di immagini satellitari;
- **Infrarosso lontano (LW)**: è la banda di utilizzo più comune, adatta alle misure vicine alle temperature ambientali e dunque utilizzata in tutte le applicazioni terrestri;
- **Infrarosso verso microonde (XLW)**: adatta per l'osservazione di temperature inferiori a 250 K, viene impiegata nell'ambito delle osservazioni astronomiche.

Va fatta qualche precisazione anche sul **tipo di sensore**, in quanto questo influenza direttamente tutte le caratteristiche della termocamera.

Per applicazioni comuni è attualmente utilizzato un sensore di tipo **microbolometrico a matrice piana**, esistono sensori a maggiori prestazioni a **cella singola** o a **matrice di punti**.

I sensori possono essere:

- **Non raffreddati**;
- **Raffreddati**: il sistema di raffreddamento è solitamente costituito da **celle Peltier** o **pompa Stirling**. I sensori raffreddati sono utilizzati per applicazioni di ricerca e sviluppo e hanno **sensibilità termica superiore** rispetto ai microbolometri non raffreddati.

I produttori di sensori microbolometrici sono statunitensi, francesi o giapponesi.

Il **materiale** costituente il sensore influenza la sensibilità termica della termocamera.

I sensori più comuni sono o in **silicio amorfo** o in **ossido di vanadio**, quest'ultimo di qualità migliore rispetto al primo (il quale ha anche un tempo di vita medio più basso).

Come per le macchine fotografiche digitali, la risoluzione della termocamera è una caratteristica che influenza la qualità dell'informazione acquisita e dunque ne pregiudica la qualità.

Esistono le seguenti risoluzioni per le termocamere:

- **4x4 pixel**: adatte a sostituire un pirometro ottico;
- **da 120x140 a 160x160 pixel**: termocamere adatte a misure indicative e quindi ideali per la manutenzione predittiva;
- **da 240x240 a 324x324 pixel**: termocamere per manutenzione e per applicazioni più comuni;
- **da 500x500 e superiori**: Termocamere alta risoluzione, per applicazioni in cui serve un'alta qualità dell'immagine termografica acquisita.

Fondamentale per definire la qualità di questi strumenti di misura è anche la **sensibilità minima**, ovvero la capacità di distinguere una minima differenza di temperatura tra due punti adiacenti. Tale caratteristica è direttamente influenzata dalla catena di misura sensore e dall'elettronica di controllo.

Le termocamere si differenziano anche per **frequenza di acquisizione**:

- **< 33 Hz**: termocamere in grado di analizzare **fenomeni statici**. Non sono adatte a misurazioni in ambito di manutenzione meccanica o con organi rotanti in movimento;
- **da 33 Hz a 60 Hz**: termocamere per analisi di **eventi brevi e rapidi**;
- **da 60 Hz a 2 kHz**: termocamere per analisi particolari e avanzate.

La frequenza di acquisizione è un parametro fondamentale nell'utilizzo della termocamera. Infatti, volendo misurare la temperatura di oggetti in movimento (oppure se lo strumento non è fisso durante la misurazione, ma sorretto dall'operatore) uno strumento con una frequenza di acquisizione non sufficientemente elevata presenta il fenomeno di **smearing** sull'immagine che impedisce di avere una misura di temperatura accurata.

A parità di costo conviene acquistare termocamere con frequenza di acquisizione uguale o superiore ai 60 Hz in modo da coprire la maggior parte delle applicazioni.

Inserendo nello strumento (o nei software di elaborazione utilizzati) **l'emissività** e la **temperatura ambiente** (quella riflessa) è possibile misurare la temperatura corretta in ogni singolo punto dell'immagine.

Alcune termocamere presentano al loro interno molte funzionalità per facilitare l'uso dello strumento in ambienti industriali e civili, ad esempio la possibilità di memorizzare commenti di testo, commenti vocali, fotografie nello spettro del visibile.

Le termocamere sono utilizzate anche per la rilevazione delle temperature corporee degli individui. Per questo genere di misure le termocamere più indicate sono le fotocamere con risoluzione e sensibilità più elevate (come le serie A, T o E); queste, infatti, permettono un rilevamento istantaneo della temperatura con un altissimo grado di precisione ($\pm 0,2\%$ °C).

Vediamo infine alcuni limiti di questi strumenti:

- Le termocamere con una buona risoluzione (più di 320×240 pixel) sono molto costose;
- Le immagini di difficile interpretazione se il valore di emissività è sconosciuto;
- ***I riflessi possono essere molto fastidiosi.***
- La precisione è solitamente inferiore a quella di una misura a contatto;
- È possibile rilevare solo le temperature superficiali;
- Con vento forte, radiazione solare o superfici umide, la precisione di misura diminuisce notevolmente;
- Fattori atmosferici come neve o pioggia riducono il fattore di trasmissione dell'aria, ostacolando la misurazione della temperatura degli oggetti;
- Il rilevamento di movimenti rapidi è limitato dal frame rate spesso basso (<50 Hz).

4. Metodi per la misura di emissività

Per poter effettuare misurazioni della temperatura per mezzo di dispositivi senza contatto è fondamentale conoscere l'emissività dei corpi di cui stiamo misurando la temperatura.

Sorge dunque la problematica di dover misurare l'emissività dei corpi, problematica risolvibile in diversi modi:

- metodi **indiretti**;
- metodi **diretti**.

4.1 Metodi indiretti per il calcolo dell'emissività

I **metodi indiretti** non misurano direttamente l'emissività, ma la ricavano sfruttando proprietà e relazioni viste nel paragrafo 2.3.

In particolare, abbiamo un primo metodo basato sulla relazione che intercorre tra emissività e riflettività per corpi opachi (2.4.2); tale metodo sfrutta un apposito strumento, chiamato **riflettometro**, il quale permette di determinare la riflettività nell'intervallo del vicino infrarosso, visibile a temperature moderate.

Un secondo metodo invece si basa sulla relazione che esiste tra assorbimento ed emissività (**legge di Kirchhoff**: l'emissività emisferica totale di una superficie a temperatura T è uguale al coefficiente di assorbimento emisferico globale di un corpo nero alla medesima temperatura). Gli strumenti che permettono di attuare questo metodo sono chiamati **spettrofotometri**, un tempo si usavano spettrofotometri **ad infrarossi**, ma sono diventati obsoleti, in quanto sostituiti dagli spettrofotometri **a trasformata di Fourier** molto più pratici, veloci e accurati.

4.2 Metodi diretti per il calcolo dell'emissività

Per quanto riguarda i **metodi diretti**, invece, tramite opportuni dispositivi, è possibile ottenere direttamente la misura di emissività.

Abbiamo, anche in questo caso, due metodi differenti;

il primo metodo, detto **calorimetrico** consiste nell'ottenere il valore dell'emissività totale emisferica grazie alla relazione che lega la tensione in uscita dallo strumento al flusso termico tra il campione e la superficie di un apposito strumento chiamato **emissometro**:

$$\Delta V \propto \frac{\sigma_0(T_{emissometro}^4 - T_{sup,campione}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{campione}} + \frac{1}{\varepsilon_{emissometro}} - 1} \quad (2.12)$$

Con ΔV variazione di tensione in uscita, σ_0 costante di Stefan-Boltzmann e ε emissività.

Per questo metodo è necessario scaldare il provino, ed effettuare ogni volta la taratura dello strumento con emissività note, nonché apportare correzioni al valore di emissività. Un altro svantaggio consiste nel fatto che tale strumento fornisce solo il valore dell'emissività emisferica.

Il secondo metodo è detto invece **radiometrico** e consiste nel confrontare direttamente la radiazione emessa da un campione a temperatura uniforme e stabile con la radiazione proveniente da un corpo nero di cui conosciamo la temperatura.

Ad esempio, è possibile utilizzare contemporaneamente un termometro a contatto (es. termocoppia) e una termocamera. Poniamo la termocoppia sul corpo nero di riferimento e poi, impostata l'emissività della termocamera a 1 andiamo a confrontare le temperature rilevate, le quali saranno diverse in quanto il corpo non avrà mai emissività pari a 1. A questo punto abbassiamo il valore di emissività fino ad avere lo stesso valore di temperatura dalla termocoppia e dalla termocamera; quello ottenuto è il valore esatto di emissività del corpo. Si può procedere anche senza termometro a contatto, andando a rivestire parte del corpo con un rivestimento di cui conosciamo l'emissività (es. vernice alto-emissiva). A questo punto, tramite la termocamera andiamo a regolare il valore di emissività finché la temperatura sul riferimento e sul campione non è la stessa.

5. Applicazioni delle vernici alto-emissive

In letteratura abbiamo già alcuni esempi di utilizzo di vernici alto emissive per applicazioni ad alte temperature.

Tali applicazioni possono spaziare in vari ambiti e settori, a dimostrazione della versatilità di questi rivestimenti.

Nel settore aerospaziale, ad esempio, le vernici alto emissive vengono utilizzate per rivestire gli MTPS (*metal thermal protection systems*), ovvero gli scudi termici che proteggono i veicoli spaziali dalle elevate temperature provocate dall'attrito con l'atmosfera [2]. In questo modo è stato possibile aumentare la durata e le prestazioni dello scudo.

Esistono poi applicazioni di natura più sperimentale, come suggerito dal set-up sperimentale di D. Hoser et al. [3], in cui dei campioni di roccia sono stati rivestiti con uno strato di vernice alto emissiva in modo da sfruttare l'emissività di questa come riferimento per poter misurare l'emissività del campione stesso.

Vengono sfruttate anche in ambito di misurazioni termiche e meccaniche, come la tecnica TDIC (infrared thermography and digital image correlation), una tecnica innovativa per la misurazione combinata e contemporanea della distribuzione di temperatura e deformazioni. Per poter applicare la tecnica è stato necessario rivestire la superficie dei provini con un pattern di vernice alto emissiva bianca su uno strato uniforme di vernice alto emissiva nera, in modo da avere una superficie uniforme e di emissività nota, che si è rivelata un'ottima base per l'utilizzo contemporaneo degli strumenti di misura di deformazione e temperatura [4].

Questo articolo è stato di rilevante importanza per il nostro lavoro, soprattutto per quanto riguarda lo spessore delle vernici di riferimento. Infatti, nel paragrafo 4: **paint emissivity** viene riportato il risultato degli studi condotti sulla relazione tra spessore ed emissività, con particolare riferimento all'influenza del substrato. Tale studio prova il fatto che rivestimenti di spessore da **18 μ m** in su non risentono più dell'influenza dell'emissività del substrato. Pertanto, ci siamo rifatti a questo valore limite per la deposizione delle vernici di riferimento utilizzate nel nostro set-up.

Anche l'articolo di Xiaodong et al. è focalizzato sul legame tra l'emissività e altre proprietà, tra cui **spessore** e **temperatura**, in particolar modo in due paragrafi:

- Nel paragrafo 2.5 si fa particolare riferimento al legame tra **emissività** e **spessore del rivestimento** mostrando due risultati notevoli:
 - Il primo è che esiste un'effettiva correlazione tra emissività e spessore, dovuta ad un fattore: la **profondità di penetrazione della luce** (d_p), definita come l'inverso del coefficiente di assorbimento. Questa relazione fa sì che l'emissività cresca molto rapidamente al

crescere dello spessore, fino a stabilizzarsi al raggiungimento di un valore limite, che dipende dalla natura del rivestimento;

- Il secondo risultato è che l'emissività risulta influenzata anche dagli **strati** di rivestimento, in quanto all'interfaccia ottica tra i vari strati si verifica un fenomeno di **interferenza** per cui, al variare dello spessore degli strati possiamo avere dei picchi di emissività (interferenza costruttiva) oppure l'attenuarsi del valore di emissività (interferenza distruttiva). Motivo che ci ha spinto, come vedremo nel seguito, ad applicare un solo strato di vernice di riferimento.
- Il paragrafo 3, invece, è incentrato sulla caratterizzazione dell'emissività; in particolare, descrive quattro metodologie differenti per stimare il valore di emissività di un corpo, tra cui l'**energy method**. Questa tecnica consiste nello sfruttare il corpo nero come riferimento e dunque utilizzare la legge di Stefan-Boltzmann per calcolare l'emissività ed è proprio la tecnica su cui ci siamo basati per il nostro set-up.

6. Fase sperimentale

Terminata questa prima fase bibliografica abbiamo gli strumenti necessari per addentrarci nella fase sperimentale.

Siamo partiti dalla preparazione dei provini, durante la quale è stato svolto il lavoro di caratterizzazione dello spessore, per poi passare all'allestimento del set-up sperimentale, grazie al quale abbiamo acquisito e in seguito elaborato i dati sulla temperatura al fine di caratterizzare l'emissività dei pigmenti ceramici.

6.1 Caratterizzazione dello spessore delle vernici

Siamo partiti dall'idea di realizzare dei provini ceramici rivestiti di vernici alto emissive di cui è nota l'emissività media, al fine di usare tali provini come campioni di riferimento per la misurazione dell'emissività dei pigmenti.

6.1.1 Vernici di riferimento utilizzate

Per il nostro esperimento abbiamo utilizzato non una, ma due vernici alto emissive di riferimento, ognuna delle quali ha specifiche caratteristiche termomeccaniche e data sheet nei quali sono riportati i valori di emissività nel range di temperatura compreso fra 300 e 900°C.

Queste vernici sono la **Aremco Hie-coat 840-C** e la **Aremco Hie-coat 840-CM**.



Figura 15 - Le vernici Aremco Hie-coat-840C e CM

Entrambe sono vernici ceramiche di colore nero a base d'acqua, la cui elevata emissività le rende ideali per il rivestimento di materiali ceramici e refrattari.

Entrambe resistono senza alterazioni delle proprietà meccaniche fino a circa 1100°C.

Presentano delle lievi differenze di aspetto (la C risulta più scura e con una texture più opaca rispetto alla CM), ma ciò che è di maggior rilevanza è la differenza di emissività media:

- 0,88 per la **Aremco Hie-coat 840-C**;
- 0,94 per la **Aremco Hie-coat 840-CM**.

Le due vernici hanno inoltre due processi di polimerizzazione leggermente diversi:

- La prima ha subito una fase di asciugatura all'aria per 60 minuti, per poi completare la polimerizzazione in forno a 100°C per ulteriori 60 minuti;
- La seconda ha subito lo stesso una prima asciugatura all'aria per 60 minuti, ma poi ha completato la polimerizzazione in forno in due fasi, una prima fase di 30 minuti a 100°C e una fase finale a 250°C per 60 minuti.

Per quanto riguarda la disposizione delle due vernici sul provino, abbiamo suddiviso il campione in quattro quadranti e abbiamo applicato le vernici diagonalmente, su una diagonale la C e sull'altra la CM. Il motivo di questa scelta è giustificato dalla necessità di compensare gli eventuali gradienti termici che potrebbero generarsi sul provino trasversalmente e longitudinalmente. L'aspetto finale del provino è questo:

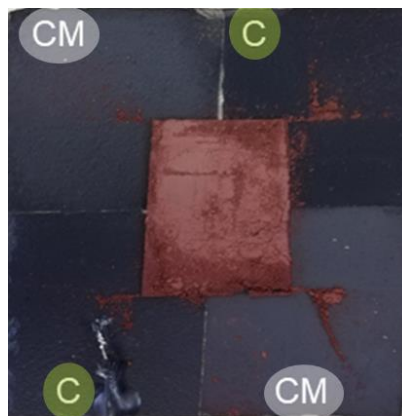


Figura 16 - provino con campione di pigmento, con disposizione diagonale delle vernici di riferimento

Abbiamo inoltre dovuto caratterizzare il metodo di deposizione delle vernici, in modo tale da garantire due condizioni fondamentali per non incorrere in gravi errori di misura:

- Il raggiungimento dello spessore ottico minimo affinché l'emissività della vernice non sia influenzata da quella del supporto ($\approx 18 \mu\text{m}$) [1]
- L'uniformità del rivestimento, per non incorrere in gradienti termici che porterebbero ad errori di misurazione.

6.1.2 Metodi di deposizione

Abbiamo confrontato due possibili metodi di deposizione per verificare quale dei due risultasse ottimale per il nostro esperimento.

- **AEROGRAFO**

Per analizzare lo spessore abbiamo inizialmente pensato ad un set-up di verniciatura basato sull'utilizzo di un aerografo. In particolare, abbiamo utilizzato l'aerografo *ULTRA Harder&Steenbeck*.

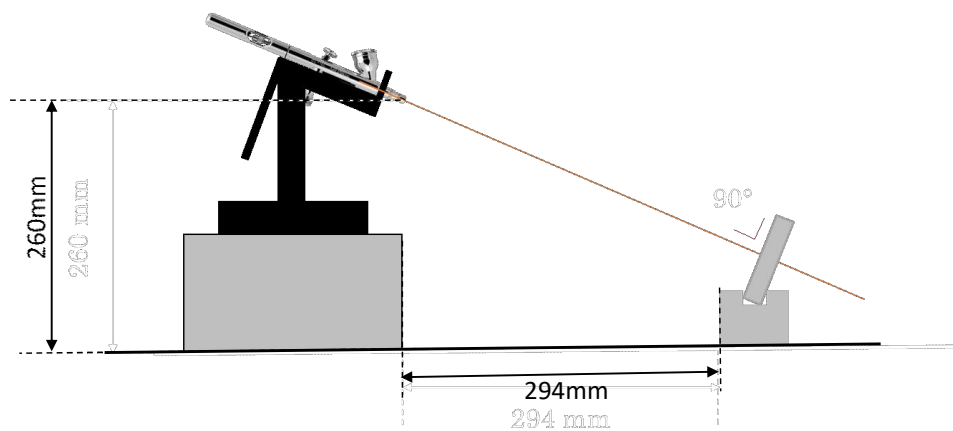


Figura 17 - set-up di deposizione con aerografo

L'idea è stata quella di mantenere l'aerografo fisso, tramite apposito supporto, in modo che il getto fosse perpendicolare al campione di prova. In questa maniera lo spessore dello strato di vernice risulta funzione del tempo di erogazione della vernice. Abbiamo pertanto realizzato nove campioncini metallici quadrati di 5cm di lato e abbiamo deposto la vernice con tempi di erogazione crescenti:

- 3 campioncini con $T_1 = 5s$;
- 3 campioncini con $T_1 = 10s$;
- 3 campioncini con $T_1 = 15s$.

Il secondo step è stato quello di andare a misurare lo spessore della vernice su ogni campioncino con lo **spessimetro Minitest3100**. Questo strumento possiede diverse tipologie di sonda, in particolare, per il nostro esperimento abbiamo utilizzato una **sonda di tipo F** il cui funzionamento è basato sul principio dell'induzione elettromagnetica, ideale per misurare lo spessore di rivestimenti non magnetici su supporti ferrosi (anche acciai legati o temprati, ma non sugli austenitici). Per questo motivo per questa fase del nostro studio abbiamo utilizzato campioncini metallici e non ceramici.



Figura 18 - Minitest3100 con sonda di tipo F

Tramite lo spessimetro sono state fatte misurazioni multiple su ogni provino, su cinque aree diverse: i quattro angoli (denominati **d1**, **d2**, **d3**, **d4**) e l'area centrale (denominata **d0**).

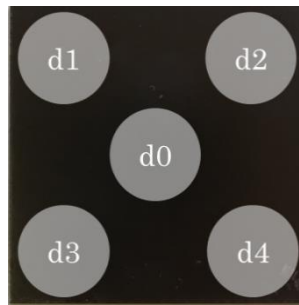


Figura 19 - aree del provino su cui sono state effettuate le misurazioni

- **PENNELLO DI SPUGNA**

Abbiamo realizzato altri nove provini, applicando su ciascuno di essi una mano di vernice e procedendo a misurare lo spessore in modo analogo a quanto visto precedentemente. In questo caso non è stato possibile basare lo studio sui tempi di erogazione; perciò, ci siamo concentrati sul verificare il raggiungimento dello spessore minimo, la ripetibilità della misurazione all'interno del singolo provino (**intra-ripetibilità**, buon indice dell'uniformità del rivestimento) e la ripetibilità del metodo di deposizione tra un provino e l'altro (**inter-ripetibilità**). È bene ricordare che per **ripetibilità** di una misura si intende il grado di concordanza di una serie di misure su un misurando quando le condizioni di misura vengono lasciate invariate.



Figura 20 - pennello in spugna utilizzato per l'applicazione della vernice

I risultati di questa fase di studio verranno analizzati in dettaglio nel prossimo capitolo

6.1 Caratterizzazione di polveri ceramiche ad alte temperature

Una volta determinato il metodo di deposizione delle vernici di riferimento e dunque ultimata la fase di realizzazione dei provini, abbiamo dovuto allestire il set-up di acquisizione dei dati relativi alla temperatura di **tre pigmenti ceramici** di cui andava caratterizzata l'emissività:

- **20-R-01544**: il primo pigmento che abbiamo testato è stato un pigmento che nella sua versione *grezza* appare di colore **bruno-rossastro** e il cui colore finale, termicamente trattato sapevamo dovesse essere **nero**.

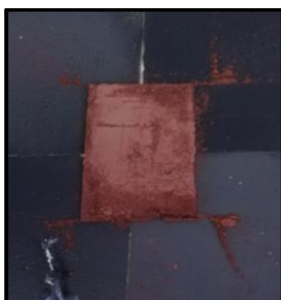


Figura 21 - campione 20-R01544 pronto per il test

- **20-R-01538**: il secondo pigmento trattato appariva nella versione *grezza* di colore **cipria** e, trattato termicamente avrebbe dovuto assumere colorazione **giallo ocra**.



Figura 22- campione 20-R-01538 pronto per il test

- **20-R-00144**: il terzo ed ultimo campione era di base color **verde salvia** e ci si aspettava una colorazione **blu elettrico** al seguito del trattamento termico.



Figura 23 - campione 20-R-00144 pronto per il test

6.2.1 Descrizione del setup e della strumentazione utilizzata

Per poter caratterizzare l'emissività dei pigmenti in funzione della temperatura, abbiamo sfruttato un **Forno per alte temperature** da laboratorio del tipo *Muffola* prodotto dal gruppo *La Porta Forni*. Il forno in questione è un forno da 2,5kW capace di raggiungere la temperatura di circa 1200°C.



Figura 24 - forno Muffola, gruppo La Porta Forni

Per quanto riguarda l'acquisizione delle scale di temperatura ci siamo affidati a due strumenti di misura, uno a contatto (termocoppia) e uno senza contatto (termocamera IR):

- **Termocoppia di tipo K:** trattasi di una termocoppia (strumento di cui abbiamo parlato nel paragrafo 2.4) costituita da due fili accoppiati, uno di **Ni-Cr** e uno di **Ni-Al**. È una termocoppia capace di misurare un ampio range di temperature ($-200\div 1260^{\circ}\text{C}$) e dunque ideale per il nostro esperimento. Per poter acquisire i dati è stata corredata da una **scheda di acquisizione National Instruments NI 9213** collegata allo **Chassis National Instruments NI cDAQ-9174**. In questa maniera la termocoppia è stata collegata al pc, dove, tramite il software **labVIEW18** è stato possibile settarne i parametri e le modalità di acquisizione, tra cui la **frequenza di campionamento**, impostata a 10Hz



Figura 25 - termocoppia di tipo K con scheda di acquisizione

- **Termocamera:** la termocamera che abbiamo utilizzato è una **Variocam HD** abbinata ad un'ottica da 60mm. La termocamera IR in questione, con sensore microbolometrico non raffreddato, permette l'acquisizione di immagini termografiche in un range di temperatura pari a $-40\div 2000^{\circ}\text{C}$, con una risoluzione di 1024x768 e una sensibilità di 0,02K. Per poterla utilizzare è stata collegata al software **Irbis3 plus**, grazie al quale è stato possibile selezionare la giusta scala di misura (per via dell'ampio range di utilizzo è possibile settare diverse scale) ed è stata regolata l'inquadratura e la messa a fuoco sul provino. Abbiamo infine settato i parametri di acquisizione, con frequenza di campionamento 1Hz.



Figura 26 - termocamera Variocam HD

Come è possibile notare in Figura 26, la termocamera è stata posizionata di fronte al provino ad una distanza di 80cm e ad una altezza di 195cm. Il provino è stato inserito all'interno della muffola, dopo essere stato opportunamente preparato.

Vediamo in dettaglio gli elementi chiave del set-up:



Figura 27 - set-up di acquisizione

Nel cerchio 1 abbiamo il provino, posizionato nel forno. Prima di essere posizionato, il provino è stato preparato seguendo questo iter:

- Deposizione della vernice Aremco Hie-coat-840CM secondo le modalità descritte al paragrafo 6.1.2;
- Applicazione della termocoppia con collante ceramico per alte temperature in modo che il giunto sia a contatto con il supporto:

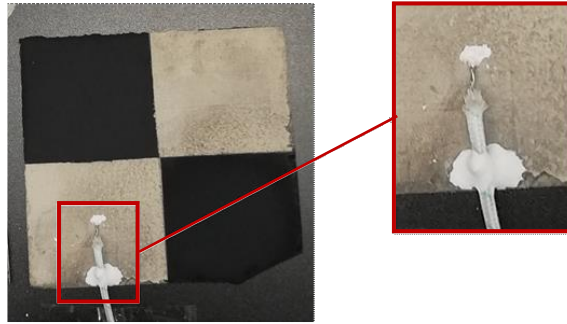


Figura 28 - dettaglio applicazione della termocoppia

- Deposizione della vernice Aremco Hie-coat-840C;
- Deposizione del campione di pigmento con ausilio di dime guida:

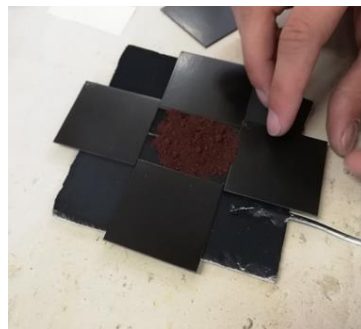


Figura 29 - dettaglio deposizione del campione

Nel cerchio 2 possiamo notare la termocoppia inserita nella scheda di acquisizione, quest'ultima collegata al pc, sul quale è stato aperto il **VI** (virtual instrument) dedicato all'acquisizione su labVIEW. Qui, attraverso il **block diagram** è stato possibile impostare il tipo di termocoppia e testarne il funzionamento. Abbiamo inoltre creato la cartella sulla quale salvare il file txt. relativo all'acquisizione.

Nel cerchio 3, infine, abbiamo la termocamera, posizionata ad un'altezza e una distanza dal forno tali da permettere di inquadrare l'intera superficie del provino con un angolo il più vicino possibile a 90°. La termocamera è stata collegata direttamente al pc, sul quale, tramite Irbis3 plus è stata inizializzata e preparata per l'acquisizione, settando i vari parametri e creando, anche in questo caso, la cartella di destinazione dei dati acquisiti.

6.2 Acquisizione dei dati

Una volta allestito il set-up di acquisizione abbiamo potuto procedere con la fase di sperimentazione vera e propria, ovvero acquisire le scale di temperatura dei pigmenti.

I tre campioni sono stati trattati tutti con una prima **fase di riscaldamento** per poi passare alla **fase di cottura**. I **tempi** e le **temperature** erano però diversi da provino a provino, e sono schematizzati come segue:

	Pigmento 20-R-01544 <i>Black</i>	Pigmento 20-R-01538 <i>Yellow</i>	Pigmento 20-R-00144 <i>Blue</i>
RISCALDAMENTO	Dalla temperatura ambiente fino a 960°C	Dalla temperatura ambiente fino a 1000°C	Dalla temperatura ambiente fino a 1200°C
COTTURA	960°C per 30 minuti	1000°C per 60 minuti	1200°C per 180 minuti

Per quanto riguarda le **acquisizioni** durante il trattamento termico, queste sono state eseguite per tutti e tre i provini seguendo il seguente iter:

- Riscaldamento del provino:
step di 100°C alla volta
- Fase di assestamento (a forno chiuso):
60 secondi
- Acquisizione con termocamera (a forno aperto):
Frequenza di campionamento: 1Hz
Tempo di acquisizione: 120s
- Acquisizione con termocoppia in modo continuativo durante tutto l'esperimento:
Frequenza di campionamento: 10Hz.
- Dopo la fase di cottura, nuova acquisizione:
Frequenza di campionamento: 1Hz
Tempo di acquisizione: 120s

L'acquisizione delle temperature attraverso la termocoppia ha restituito direttamente i file txt. da utilizzare nella fase di elaborazione, che analizzeremo nel prossimo paragrafo.

La termocamera ha acquisito invece **immagini termografiche** dei vari provini (120 per ogni acquisizione), dalle quali è stato necessario estrapolare i file txt. da utilizzare per l'elaborazione. Questo processo è stato fatto direttamente su Irbis3 plus.

Il software permette infatti di selezionare delle **aree** sull'immagine delle quali si può estrapolare la **temperature chart**, che viene salvata in formato txt.

Nel nostro caso abbiamo selezionato otto aree, quattro sul campione di pigmento e quattro sulle vernici di riferimento (una per ogni quadrante). Questo perché in fase di elaborazione avremo quattro misure di emissività, ognuna ottenuta utilizzando come riferimento la vernice di un quadrante.

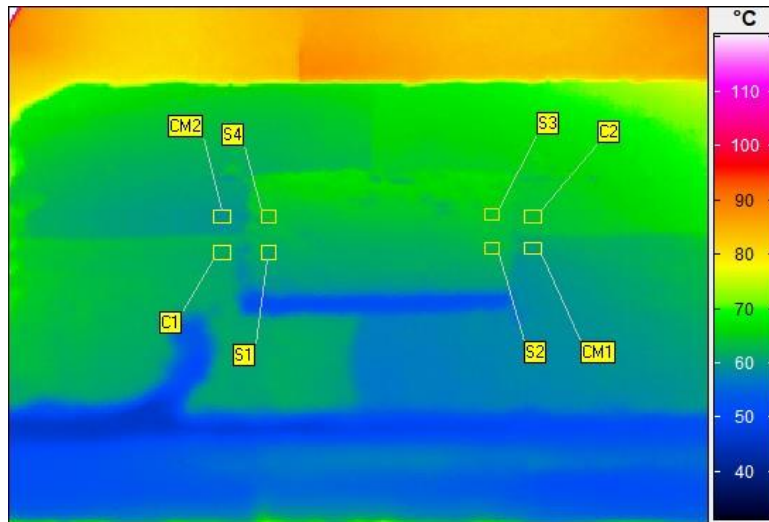


Figura 30 - immagine termografica del provino con le otto aree di selezione

6.3 Elaborazione dei dati

Arrivati a questo punto, il nostro esperimento ci ha fornito i dati relativi alle temperature dei provini in formato txt.

Tramite il software **Matlab** abbiamo elaborato questi dati per calcolare i valori di **emissività** alle varie temperature e dunque ottenere grafici che ne mostrino **l'andamento in funzione della temperatura**

Per farlo è stato sfruttato un opportuno **codice**, basato sulla legge di Stefan-Boltzmann, descritta nel paragrafo 2.3.3.

Analizziamo ora le righe più significative del codice per meglio comprendere come è avvenuta l'elaborazione dai profili di temperatura alla **caratterizzazione dell'emissività**.

```

6   %% termocamera
7   [camera, foldername] = uigetfile('*', 'Select T_rif file', ...
8                                   'MultiSelect', 'on');
9   camera = cellstr(camera);
10  T_file=[];
11
12  for n = 1:length(camera)
13      camera_dir = fullfile(foldername, camera{n});
14      T_file0 = importdata(camera_dir);
15      T_file=[T_file; T_file0.data(:,2:end)];
16  end
17

```

La prima parte del codice permette di aprire i file txt. dalle cartelle in cui sono salvati i dati acquisiti dalla termocoppia e dalla termocamera.

```

18 - T_vernici_orig=T_file(:,4);
19 - T_vernici=T_vernici_orig+273;
20
21 - T_C_orig= T_file(:,8);
22 - T_C=T_C_orig+273;
23

```

Come spiegato precedentemente, dall'acquisizione con la termocamera abbiamo ottenuto otto profili di temperatura, quattro derivanti dalle aree selezionate sul provino e quattro derivanti dalle aree selezionate sulle vernici di riferimento.

Nell'elaborazione è necessario confrontare i profili adiacenti relativi alla **temperatura di riferimento** (5;6;7;8) e **del campione** (1;2;3;4) in modo tale da compensare il più possibile l'effetto del gradiente termico che si crea sul provino.

In merito alla selezione delle temperature bisogna precisare che abbiamo selezionato, per ogni range di temperatura su cui abbiamo fatto l'acquisizione, **solo l'ultimo punto acquisito**, e non tutti i 120 punti. Il motivo di questa scelta si può comprendere osservando la temperature chart:

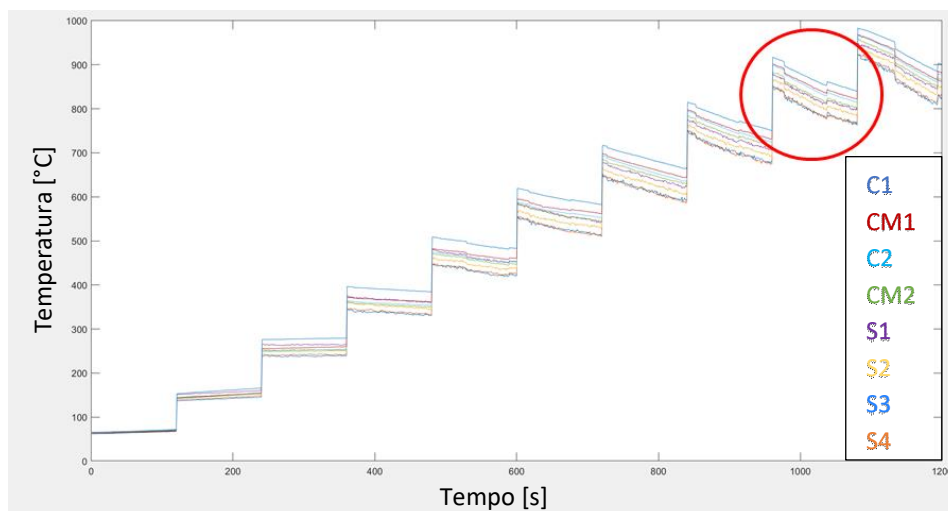


Figura 31 - temperature chart derivante dalle immagini termografiche

Osservando la temperature chart abbiamo infatti notato che nel corso dei due minuti di acquisizione le temperature non erano stabili, soprattutto alle alte temperature (cerchio rosso) e tendevano a stabilizzarsi alla fine dei due minuti. Una possibile spiegazione è da ricercarsi nel fatto che all'apertura del forno la forte differenza tra la temperatura interna ed esterna genera **moti convettivi** che portano a delle **fluttuazioni della temperatura**.

```

25  %% correzione riferimento-emissività MEDIA
26  T_C_corrected_MEAN=T_C.*nthroot(1./0.94,4);
27
28  % Stephen-Boltzmann
29  T_C_MEAN=(((T_C_corrected_MEAN).^4)); %reference
30  T_vernici2=(((T_vernici).^4));
31  e_value= T_vernici2(:,1)./T_C_MEAN(:,1);
32
33
34  %% emissività CM teorica diversi RANGE
35  CM_x = [45.5874928  94.21675008 142.9097834 188.6212853 238.5012622 287.7682803 3
36  CM_y=[0.954823502  0.946081497 0.952043355 0.961968728 0.964954395 0.971504975 0
37  CM_std=[0.006292584 0.00352278 0.006632142 0.003223323 0.009038959 0.006954743 0
38  % plot emissività

```

Questa è la parte centrale del codice, nella quale viene sfruttata la **legge di Stefan-Boltzmann** per calcolare l'emissività del pigmento. Prima di questo però avviene una **correzione** delle temperature delle **vernici di riferimento** grazie ai valori teorici di emissività di cui disponiamo. Se la vernice con cui stiamo confrontando il pigmento è la **CM** bisogna inserire il valore medio **0,94**, se la vernice è la **C** bisogna inserire **0,88**.

```

40- figure
41- plot(T_C_corrected_MEAN(1:120:end)-273,e_value(1:120:end),'.','MarkerSize',25,'LineWidth',2,'Color
42- set(gca,'FontSize',25); grid on;
43- xlim([50 1200]);ylim([0 1])
44- xlabel('T_i_0_i (°C)')
45- ylabel('emissivity')
46

```

Arriviamo così alla parte finale del codice, quella destinata al **plot** dei grafici dell'emissività in funzione della temperatura, vengono già specificati nel codice i nomi degli assi e i loro limiti.

7. Risultati e discussione

In questo capitolo verranno analizzati i risultati dello studio condotto sullo **spessore** delle vernici di riferimento e quelli relativi alla **caratterizzazione dell'emissività** dei tre pigmenti ceramici in funzione della temperatura.

7.1 Risultati relativi alla caratterizzazione dello spessore delle vernici

-Deposizione con aerografo

Tutte le misure effettuate come descritto nel paragrafo 6.1.2 sono state inserite in fogli di calcolo Excel per ottenerne media e deviazione standard.

I dati ottenuti sono stati trasformati in un grafico che facilita la visualizzazione dell'andamento dello spessore sui provini:

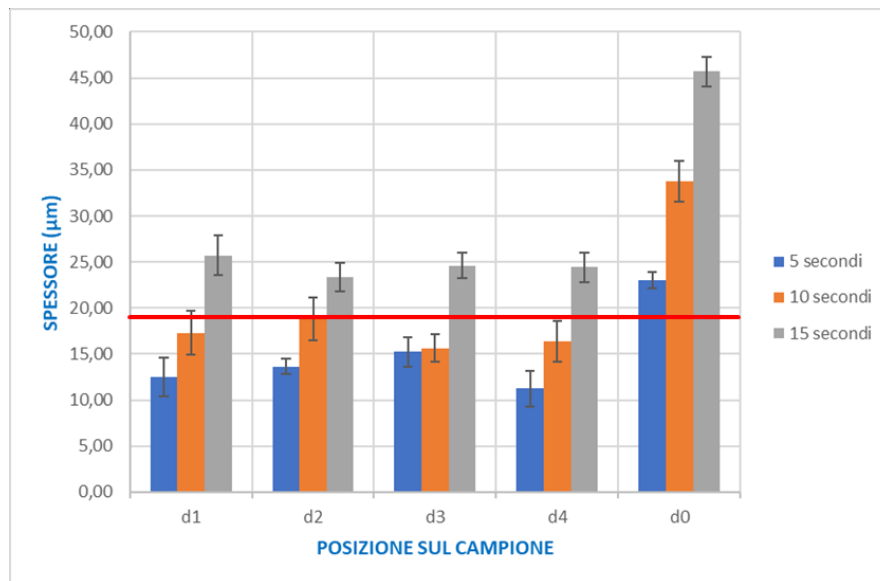


Figura 32 - andamento dello spessore con verniciatura ad aerografo

Il grafico mostra l'andamento dello spessore in funzione della posizione sul campione. Abbiamo riportato i valori ottenuti con tutti e tre i tempi di erogazione: in blu i campioni da 5s, in arancione quelli da 10s e infine, in grigio, quelli da 15s.

Nel grafico appare inoltre la linea che indica lo spessore ottico minimo da raggiungere per evitare l'influenza dell'emissività del supporto (~18µm).

Dal grafico si notano subito due problematiche:

- Nelle aree più esterne del provino si riesce a raggiungere lo spessore minimo solo con tempi di erogazione lunghi (15s);

- C'è una netta differenza di spessore tra il centro del provino e gli angoli, indice che lo spruzzo dell'aerografo porta ad un andamento radiale dello spessore.

La non uniformità dello spessore è un problema grave, in quanto uno spessore non omogeneo può portare, in fase di riscaldamento del provino a dei gradienti termici che influenzerebbero la misura dell'emissività portando ad un errore di misura.

-Deposizione con pennello

Anche in questo caso abbiamo inserito i dati acquisiti in Excel e calcolato medie e deviazioni.

Stavolta però abbiamo racchiuso i risultati in due grafici, uno per l'inter-ripetibilità e uno per l'intra-ripetibilità:

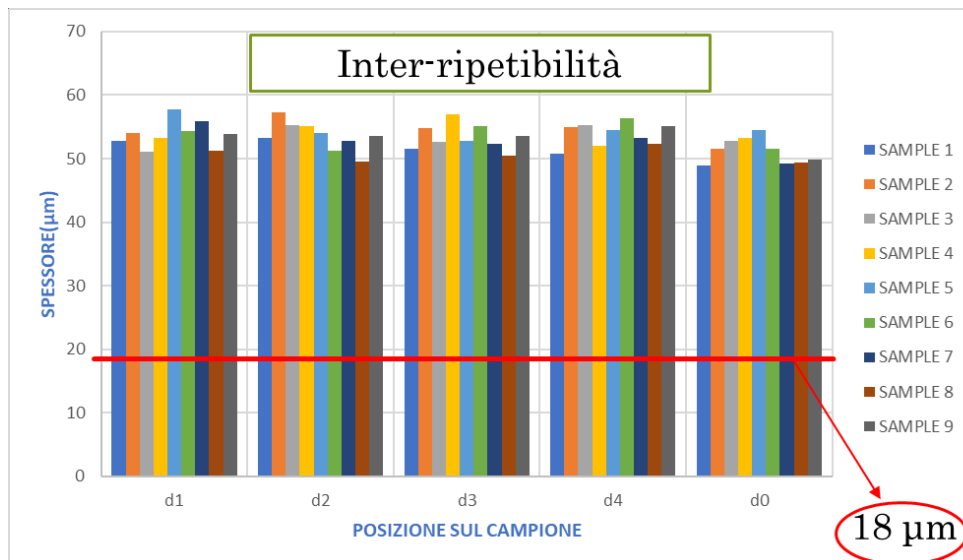


Figura 33 - grafico di inter-ripetibilità della misura

Questo primo grafico è quello relativo alla ripetibilità tra un campione e l'altro. Abbiamo lo spessore in funzione della posizione sul provino (analogamente al grafico visto per l'aerografo) e sono riportati i valori medi dello spessore delle cinque aree per tutti e nove i provini. Possiamo notare due caratteristiche:

- La prima è che il valore di spessore ottico minimo è stato raggiunto in tutte le aree di tutti i provini;
- La seconda è che per ogni area la misura dello spessore di tutti i provini è confrontabile, con differenze di max 5µm, il che significa che c'è un buon grado di concordanza e pertanto la condizione di inter-ripetibilità è soddisfatta.

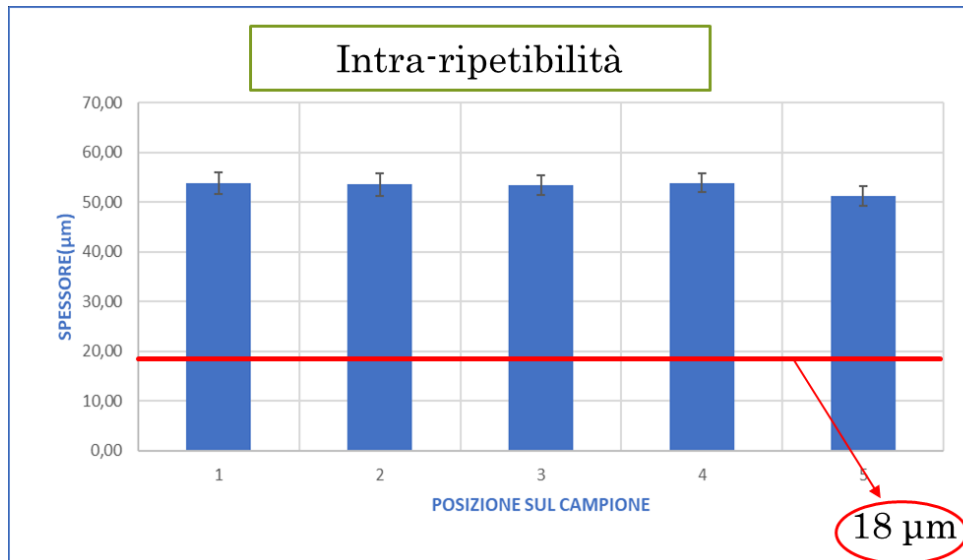


Figura 34 - grafico di intra-ripetibilità della misura

Questo secondo grafico è relativo, invece, alla ripetibilità della misura tra le cinque aree del singolo provino. Notiamo chiaramente che lo spessore minimo è raggiunto pienamente e che non c'è alcuna differenza considerevole tra aree diverse del provino.

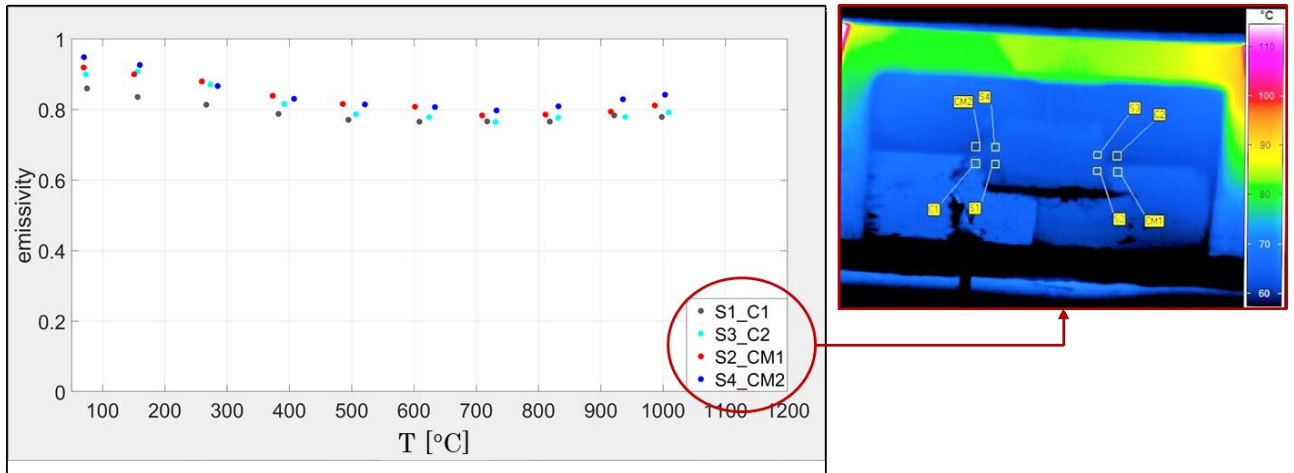
Ciò significa che, a differenza di quanto accadeva per i provini verniciati ad aerografo, in questo caso ho uno strato molto più uniforme, che sicuramente non genererà errori di misurazione nelle successive fasi dell'esperimento.

In conclusione di questa analisi possiamo dunque affermare che la **deposizione con pennello** risulta il metodo più indicato per applicare le vernici di riferimento sui provini ceramici.

7.2 Risultati relativi alla caratterizzazione dell'emissività dei pigmenti ceramici

In questo paragrafo analizzeremo i grafici sull'andamento dell'emissività delle tre polveri di pigmento derivanti dall'elaborazione vista nel paragrafo precedente.

- **Pigmento 20-R-01544 (Black)**



Come già anticipato il grafico mostra l'andamento dell'emissività del pigmento in funzione della temperatura.

Ogni 100°C abbiamo quattro valori di emissività, ognuno misurato sfruttando come riferimento un quadrante diverso: in **grigio** e in **turchese** abbiamo l'emissività ottenuta dal confronto con i due quadranti rivestiti con la vernice di riferimento **Aremco Hie-coat-840C**, mentre in **rosso** e **blu** abbiamo quella ottenuta dal confronto con **Aremco Hie-coat840CM**.

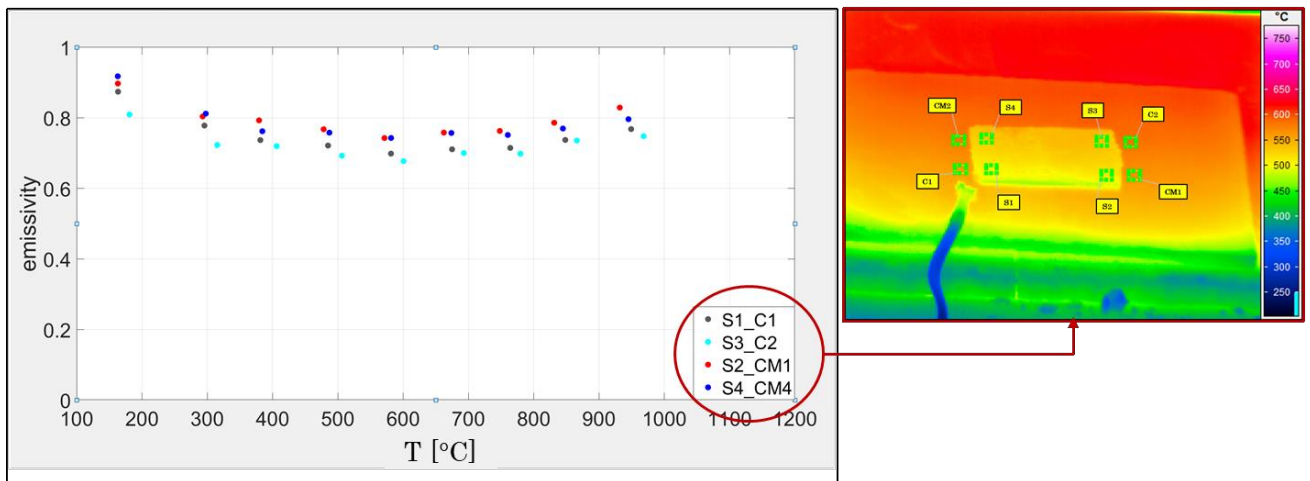
Notiamo che si parte da valori di emissività elevati a basse temperature, per poi avere un andamento decrescente fino a 700°C circa, in cui abbiamo un minimo che si attesta poco al di sotto di 0,8. Oltre questo minimo abbiamo invece un andamento crescente con la temperatura, fino al valore di circa 0,85 a 960°C, ovvero la temperatura max a cui abbiamo portato questo campione.

Osservando il campione dopo il trattamento abbiamo potuto apprezzare l'effettivo **mutamento della colorazione** della polvere:



Figura 35 – campione 20-R-01544 dopo il trattamento termico

- **Pigmento 20-R-01538 (Yellow)**



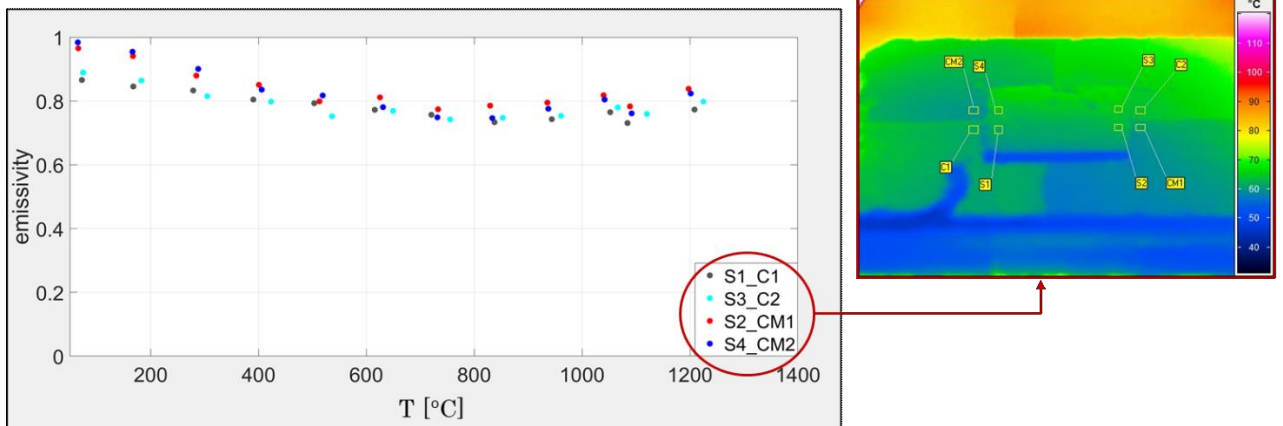
Questo è il grafico relativo al secondo pigmento trattato. Il grafico è costruito in modo del tutto analogo al precedente. L'andamento è molto simile, partiamo anche in questo caso da alti valori di emissività a basse temperature per poi arrivare, con andamento decrescente ad un minimo, in questo caso più basso, circa 0,7 a 600°C. L'emissività poi risale fino al valore di 0,8 alla temperatura massima a cui abbiamo portato il campione, ovvero 1000°C.

In questo caso il campione, a seguito del trattamento termico, non ha subito la variazione di colore attesa, ma è diventato di color grigio chiaro.



Figura 36 -campione 20-R-01538 dopo il trattamento termico

- **Pigmento 20-R-00144 (Blue)**



Abbiamo infine il grafico relativo all'emissività del terzo ed ultimo pigmento.

L'andamento, anche in questo caso, è analogo ai precedenti: emissività decrescente fino al valore di circa 0,75 a 700°C, poi crescente fino a raggiungere 0,8 a 1200°C, ovvero alla temperatura massima raggiunte dal provino.

Il provino trattato è diventato di colore blu elettrico, confermando come il trattamento termico abbia alterato il pigmento:



Figura 37 - campione 20-R-00144 dopo il trattamento termico

In generale, dunque, l'emissività di tutti e tre i pigmenti segue un **andamento analogo al variare della temperatura**. Abbiamo inoltre visto come il trattamento termico influisce sui pigmenti apportando modifiche cromatiche.

Emerge tuttavia anche una **problematica comune** a tutti e tre i test: in realtà i quattro valori di emissività nelle diverse aree di selezione riportati per ogni range di temperatura dovrebbero **coincidere** perfettamente, ma questo non si verifica. La

motivazione più plausibile è che *l'irraggiamento delle pareti del forno* riflette sul provino generando un **errore** di misurazione non trascurabile.

8. Conclusione

A conclusione di questo lavoro possiamo ricapitolare i risultati raggiunti.

- Abbiamo ottenuto la **caratterizzazione dello spessore delle vernici di riferimento** ed individuato la modalità di deposizione ottimale sui provini che garantisca l'uniformità di spessore e il raggiungimento dello spessore ottico minimo per evitare l'influenza dell'emissività del substrato.
- Abbiamo **definito il set-up di acquisizione** dei profili di temperatura dei pigmenti ceramici e le **modalità di elaborazione** di tali dati per effettuare le successive fasi sperimentali di **caratterizzazione di emissività** al variare della temperatura.
- Abbiamo provato che i pigmenti ceramici da noi presi in analisi subiscono mutazioni cromatiche se trattati termicamente, alcune di queste attese, altre inattese, aspetto che verrà approfondito in test futuri.

Dallo studio è emerso anche che questi primi risultati presentano degli errori nella misurazione, come il disallineamento dei valori di emissività di cui abbiamo parlato nel paragrafo 7.2; oppure l'andamento instabile dei profili di temperatura durante le acquisizioni.

Questo suggerisce la necessità non solo di ulteriori test per affinare i risultati, ma anche di ottimizzare il set-up con delle modifiche che riducano gli errori di misurazione.

Gli upgrade a cui si potrebbe pensare sono, ad esempio:

- Una disposizione del provino nel forno che permetta di **ridurre al minimo gli effetti dei moti convettivi** all'apertura del portello: questo ridurrebbe sensibilmente le oscillazioni di temperatura in fase di acquisizione, cosa che permetterebbe l'utilizzo di più punti di acquisiti in fase di elaborazione e pertanto porterebbe ad una più accurata caratterizzazione dell'emissività;
- Un'altra modifica che si potrebbe apportare al set-up è **l'utilizzo di supporti** che schermino il provino dall'irraggiamento delle pareti del forno, fenomeno che interferisce significativamente con le acquisizioni della termocamera. In questo modo la termocamera rileverebbe solo l'effettiva emissione del campione, riducendo notevolmente l'errore di misura e restituendo valori di emissività molto più in accordo tra loro.

Bibliografia

- [1] H. Xiaodong, L. Yibin, W. Lidong, S. Yue e Z. Sam, «High emissivity coatings for high temperature application: Progress and prospect,» *Thin Solid Films*, n. 517, pp. 5120-5129, 2009.
- [2] M. Falz e G. Leonhardt, *Surf. Coat. Technol.*, n. 61, p. 97, 1993.
- [3] D. Höser, R. Wallimann e P. R. von Rohr, «Uncertainty Analysis for Emissivity Measurement at Elevated Temperatures with an Infrared Camera,» *Springer Science+Business Media New York*, 2016.
- [4] N. Cholewa, P. T. Summers, S. Feih, A. P. Mouritz, B. Y. Lattimer e S. W. Case, «A Technique for Coupled Thermomechanical Response Measurement Using Infrared Thermography and Digital Image,» *Society for Experimental Mechanics*, 2015.

Ringraziamenti

Vorrei innanzitutto ringraziare il mio Relatore, il **Prof. Gian Marco Revel**, per avermi proposto questo lavoro di Tesi, che ho trovato interessante e stimolante e mi ha dato modo di poter apprezzare l'applicazione pratica del mio percorso di studi nel mondo della ricerca e del laboratorio.

Un *grazie* riconoscente anche alla mia Correlatrice, **Rachele Napolitano**, per avermi guidato e consigliato durante questo lavoro, con pazienza e disponibilità.

Ringrazio di cuore i miei genitori **Nadia** ed **Ermanno**, per avermi permesso, con i loro sacrifici, di studiare e di essere qui oggi e in qualunque posto la mia carriera mi porterà domani. Vi sarò per sempre grato di aver investito sul mio futuro e spero che raccoglierne i frutti vi renderà sempre più orgogliosi di me.

Grazie alla mia sorellona **Valentina** che da *acerrima nemica* di quando litigavamo da bambini, è diventata negli anni la mia sostenitrice numero 1; sono certo che in qualunque *battaglia* sarà sempre al mio fianco, pronta a combattere con me e a procurarmi la più bella e scintillante delle armature ;)

Un grazie di profondo affetto agli **amici di giù**, termine più che riduttivo per descrivere il legame che mi stringe a voi; ormai siete come fratelli e sorelle per me, non importa come siamo dislocati nel mondo, non ci separiamo mai per davvero; so che ci siete e ci sarete sempre, nel giorno di festa e in quello di lutto, nel successo e nella sconfitta, nella vicinanza e nella lontananza, siete la costante della mia vita. Vi voglio un bene infinito.

Non posso non ringraziare anche gli **amici di su**, abbiamo condiviso questo percorso accademico non da colleghi, ma da amici, costruendo un fantastico legame di cui sono contentissimo, fatto di aiuto reciproco, stima e gioia per i rispettivi successi e traguardi. Grazie a voi ho sentito un po' di meno la lontananza da casa.

Vorrei fare una menzione particolare a **Matteo Iacovanelli**, non so se ringraziarlo o chiedergli scusa per le ore passate a parlare dei miei problemi esistenziali, dandomi consigli o anche semplicemente ascoltandomi.

E come non ringraziare colui senza il quale starei ancora cercando la fantomatica aula 155/8: **Gianmarco Rosati**. Che dire, ripercorrere tutto quello che abbiamo fatto in questi anni accademici è impossibile su carta, sei stato collega, coinquilino, amico, confidente. Ti ringrazio davvero di tutto, per le mangiate *come solo noi sappiamo fare*, per gli esami preparati insieme, per aver fatto sembrare un intero lockdown quasi piacevole, per l'essermi stato accanto in momenti in cui non l'avrei fatto nemmeno io, per le risate a crepapelle per cose che fanno ridere solo noi... insomma, grazie! Ti

auguro un futuro pieno di soddisfazioni e spero che ovunque saremo tra dieci anni ti ricorderai delle mie tagliatelle.

Amore mio, l'ultimo ringraziamento di questa tesi va a te. Sei l'ultima persona ad essere entrata nella mia vita; eppure, sembra che tu mi conosca da sempre. Non so ancora come sia possibile, ma dal momento in cui le nostre vite si sono incrociate ho capito che eri la chiave che cercavo. La chiave per comprendere me stesso, per apprezzarmi, per crescere. Hai trovato un bimbo, insicuro e pieno d'amore, con un mondo dentro che non riusciva ad esprimere. Con te sento che sto cambiando, sento una sicurezza che non credevo nemmeno di avere, sento di essere un uomo, ma senza dover rinunciare a quel bimbo. In quest'ultimo anno mi hai fatto tanto di quel bene che probabilmente non puoi nemmeno immaginarlo. Seppur l'ultima arrivata, se oggi sono qui, con questa tesi in mano e la corona d'alloro in testa, è anche grazie a te. Spero con tutto il mio cuore che questo sia solo il primo di tantissimi traguardi, miei e tuoi, che vivremo mano nella mano.

Ti amo **Graziana**.