

La legge di Wiedemann-Franz

Nei metalli, il calore è trasmesso prevalentemente dagli elettroni. Per questa ragione, la conducibilità termica e la conducibilità elettrica sono collegate. La relazione che lega queste due grandezze è nota come legge di Wiedemann-Franz.

In questo esperimento, l'obiettivo è misurare le proprietà termiche ed elettriche di diversi materiali con una accuratezza ragionevolmente alta. Nella Parte A misureremo la conducibilità elettrica del rame, dell'ottone e dell'alluminio. Nella Parte B misureremo la conducibilità termica del rame. Nella Parte C misureremo il calore specifico del rame. Nella Parte D misureremo la conducibilità termica dell'ottone e dell'alluminio. Infine, nella Parte E, verificheremo che i nostri risultati sono in accordo con la legge generale che lega queste quantità nei metalli che abbiamo considerato.

In questo esperimento non è richiesto svolgere alcun calcolo degli errori.

Si noti che nelle parti B e D c'è una fase che richiede un'attesa di **15 minuti**. Si pianifichino tutte le procedure tenendone conto.

Norme di sicurezza

Non connettere alcun cavo o strumento non autorizzato direttamente alla presa di rete 220 V/25 A. È permesso connettere alla presa di rete solo gli alimentatori forniti, senza che questi possano essere modificati.

Materiale



Figura 1

1. **Rame.** Tubo cilindrico, lunghezza 200,0 mm, diametro interno 6,0 mm, diametro esterno **20,0 mm**
2. **Ottone.** Tubo cilindrico, lunghezza 200,0 mm, diametro interno 6,0 mm, diametro esterno **19,0 mm**



3. **Alluminio.** Tubo cilindrico, lunghezza 200,0 mm, diametro interno 6,0 mm, diametro esterno **20,0 mm**
4. Un piccolo magnete permanente di massa 1,2 g.
5. Un contenitore per l'acqua (si tratta di un pentolino utilizzato per la preparazione di un piatto locale chiamato "Jachun", un dolce israeliano). Il coperchio della pentola è dotato di uno scambiatore di calore nella parte interna e di una vite nella parte esterna. Vengono forniti 4 litri di acqua naturale (due bottiglie da 2 litri) .
6. Barretta #1. Barretta di rame, di diametro 20,0 mm, dotata di sensori di temperatura collegati a un cavo e di un riscaldatore collegato ai cavi rossi (Figura 2.a). I cavi rossi devono essere connessi all'alimentatore DC (punto 15 qui sotto) tramite un circuito. La barretta è ricoperta di un materiale schiumoso nero e isolante.
7. Barretta #2. Barretta di materiale composito, di diametro 20,0 mm, dotata di sensori di temperatura collegati a un cavo e di un riscaldatore collegato ai fili rossi (Figura 2.b). I cavi rossi devono essere connessi all'alimentatore DC (punto 15 qui sotto) tramite un circuito. La barretta è ricoperta di un materiale schiumoso nero e isolante.
8. Tappo di chiusura termicamente isolante
9. Alimentatore 12 V in corrente continua (DC), per l'interfaccia digitale
10. Interfaccia digitale. Questa interfaccia mostra i valori registrati da 8 sensori di temperatura (termometri) simultaneamente e il tempo, si vedano le istruzioni nel seguito. Questo apparecchio viene usato anche come cronometro.
11. Cavi per collegare i sensori di temperatura della barretta all'interfaccia digitale
12. Voltmetro. Il selettore del voltmetro deve essere impostato a 20 V DC (corrente continua). Vedi figura 3.
13. Amperometro. L'amperometro deve essere impostato a 10 ampere DC (corrente continua). Vedi figura 3.
14. Fili elettrici
15. Alimentatore 9 V DC per il riscaldatore con connettori a banana.

ATTENZIONE

1. È permesso connettere alla presa di corrente solo gli alimentatori forniti e dotati di spina standard AC. E' severamente vietato collegare cavi isolati o altri apparecchi alla presa di corrente e si possono causare gravi danni a oggetti e persone.
2. Non immergere le barrette nell'acqua.

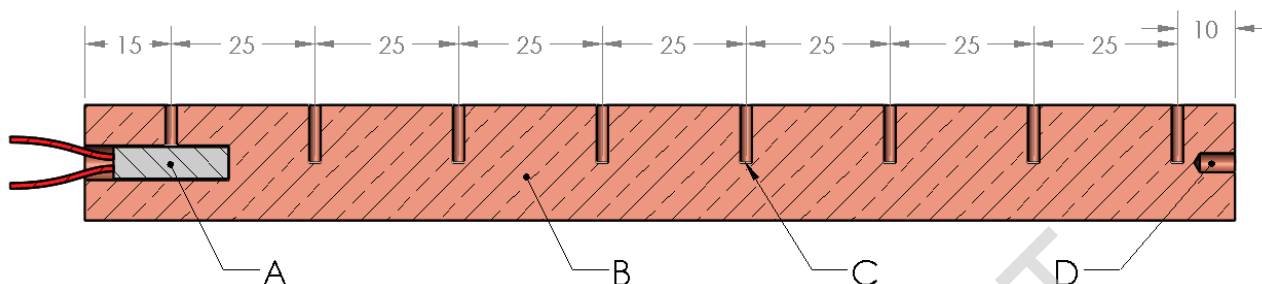


Figura 2.a .Schema della Barretta #1.

Le distanze sono fornite in mm con la precisione di 0,1 mm.

(A) Riscaldatore collegato ai fili rossi. (B) Barretta di rame. (C) Otto sensori di temperatura rappresentati da una tacca come quella mostrata in figura (D) Foro filettato per la vite posta sul coperchio del contenitore per l'acqua.

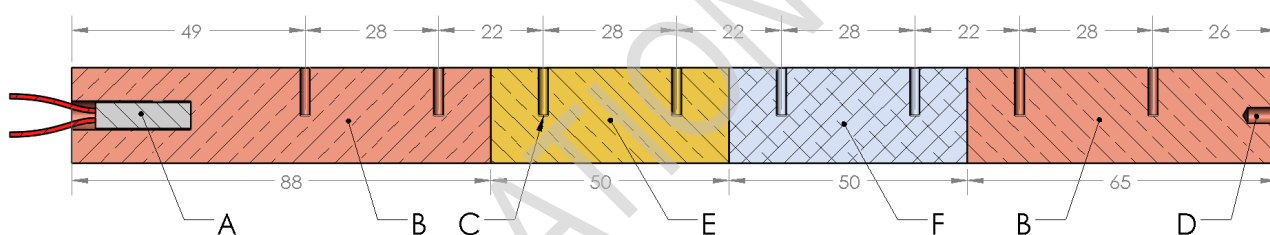


Figura 2.b. Schema della Barretta 2.

Le distanze sono fornite in mm con la precisione di 0,1 mm.

(A) Riscaldatore collegato ai fili rossi. (B) Barretta di rame. (C) Otto sensori di temperatura rappresentati da una tacca come quella mostrata in figura. (D) Foro filettato per la vite posta sul coperchio del contenitore per l'acqua. (E) Barretta di ottone. (F) Barretta di alluminio.

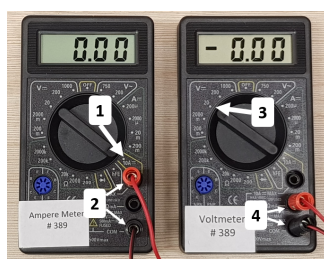


Figura 3. Amperometro e voltmetro.

(1) Posizione del selettore su 10 A come per l'esperimento. (2) Terminali d'ingresso dell'amperometro.

(3) Posizione del selettore su 20 V come per l'esperimento. (4) Terminali di ingresso per il voltmetro.



Utilizzo dell'interfaccia digitale

Collegare l'interfaccia al suo alimentatore da 12 V DC.

L'interfaccia digitale ha 2 modalità di funzionamento: cronometro e termometro. Quando i cavi dei sensori sono collegati all'interfaccia, quest'ultima passerà automaticamente alla modalità termometro. Quando i cavi sono disconnessi, l'interfaccia passa automaticamente alla modalità cronometro e lo schermo mostra la dicitura "Timer mode".

In modalità termometro:

- Mantenere premuto per 3 secondi il pulsante rosso per azzerare il cronometro.
- Premere brevemente il pulsante rosso per bloccare il valore mostrato sul display (l'interfaccia continua a misurare il tempo trascorso anche se non lo mostra).
- Premere nuovamente il pulsante rosso per riprendere la visualizzazione della temperatura dal vivo e del tempo

In modalità cronometro:

- Premere il pulsante rosso per far partire il cronometro.
- Premere nuovamente il pulsante rosso per fermare il cronometro.
- Premere un'altra volta il pulsante rosso per azzerare il cronometro.

L'interfaccia digitale deve essere calibrata per ciascuna barretta prima del suo primo utilizzo. I termometri usati nell'esperimento non sono tutti esattamente uguali. Di conseguenza, quando la barretta è in equilibrio termico, si vuole calibrare i termometri in modo che tutti segnino la stessa temperatura. Per far sì che ciò accada, collegare alla barretta un capo del cavo per i sensori di temperatura; premere e mantenere premuto il pulsante rosso mentre si connette l'altro capo del cavo all'interfaccia. La disconnessione dell'interfaccia dall'alimentazione o dai sensori di temperatura non resetta la calibrazione.

ATTENZIONE: effettuare la calibrazione **prima** di connettere la barretta al contenitore per l'acqua o il riscaldatore interno all'alimentazione. Questo garantisce che la temperatura della barretta sia uniforme durante la calibrazione.

In caso di problemi con l'interfaccia digitale, potrebbe essere utile disconnetterla e riconnetterla all'alimentazione. L'interfaccia non perde la calibrazione nel processo di disconnessione e riconnessione.

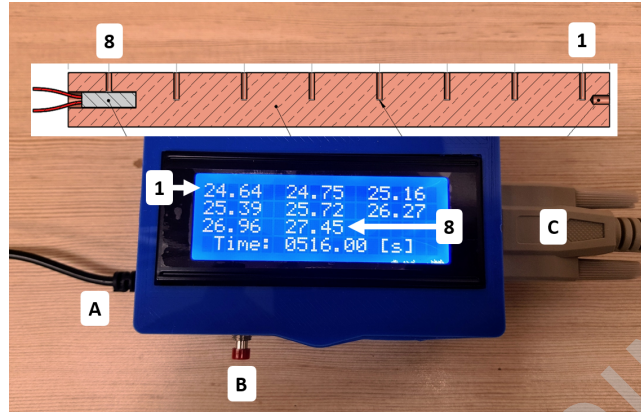


Figura 4. Interfaccia digitale

(A) Cavo per l'alimentatore a 12 V DC. (B) Pulsante rosso multifunzione. (C) Cavo per i sensori di temperatura. (1-8) Lettura in gradi Celsius dei valori registrati dagli 8 sensori di temperatura, ordinati per righe.

Parte A: Conduttività elettrica di rame, alluminio e ottone (1.5 punti)

Premesse teoriche

Quando un magnete permanente cade dentro un tubo cilindrico conduttore, su di esso agisce una forza dissipativa dovuta alle correnti parassite indotte. Di conseguenza, il magnete raggiunge una velocità limite. In questa situazione la velocità limite può essere espressa come:

$$v_{limite} = \frac{8\pi m g a^2}{\mu_0^2 (\pi r_m^2 M)^2 \sigma w f\left(\frac{d}{a}\right)}. \quad (1)$$

dove m è la massa del magnete, σ è la conduttività elettrica del materiale del tubo, a è il raggio interno del tubo, r_m e d sono rispettivamente il raggio e l'altezza del magnete, M è la magnetizzazione del magnete, w è lo spessore della parete del tubo e $f\left(\frac{d}{a}\right)$ è un fattore di scala. In questo caso, $a \approx r_m$, $d = 2r_m \approx 2a$ e $f(2) \approx 1.75$. Di conseguenza, il tempo impiegato dal magnete per cadere attraverso il tubo può essere approssimato dalla formula:

$$t = 0.22 \frac{\pi r_m^2 (\mu_0 M)^2 w L_0 \sigma}{m g}. \quad (2)$$

dove $L_0 = 0.2$ m è la lunghezza del tubo e dove si assume che il magnete raggiunga la velocità limite appena viene rilasciato.

Le caratteristiche del tubo e del magnete necessarie per i calcoli sono:

$\mu_0 M = 0.65$ T, $w_{\text{Alluminio}} = w_{\text{Rame}} = 7.0 \times 10^{-3}$ m, $w_{\text{Ottone}} = 6.5 \times 10^{-3}$ m, $m = 1.2 \times 10^{-3}$ kg, $r_m = 3.0 \times 10^{-3}$ m, $g = 9.8$ m/s²

Esperimento

A.1 Utilizzando l'interfaccia digitale in modalità cronometro, si misuri il tempo che il magnete impiega per cadere lungo i tubi di alluminio, rame e ottone. Si scrivano i risultati delle misure nella tabella A1. 1.0pt

A.2 Utilizzando le equazioni date sopra, si trovino le conduttività elettriche $\sigma_{\text{Alluminio}}$, σ_{Rame} , σ_{Ottone} per ognuno dei tre materiali. 0.5pt

Parte B: Conducibilità termica del rame (3.0 punti)

Lo scopo di questa sezione è misurare la conducibilità termica del rame in un regime quasi stazionario.

Premesse teoriche

La conducibilità termica κ è definita dall'equazione $P(x) = -\kappa A \cdot \frac{\Delta T(x)}{\Delta x}$. Questa equazione descrive una relazione lineare tra il gradiente di temperatura locale e la potenza che localmente scorre attraverso una sezione del materiale. $P(x)$ è la potenza che scorre attraverso una sezione in posizione x , A è l'area della sezione della barretta e $\Delta T(x)/\Delta x$ è il gradiente di temperatura in posizione x .

Esperimento

Connettere l'interfaccia digitale all'alimentazione e calibrare i termometri della Barretta #1. Versare 4 litri (2 bottiglie) di acqua nel pentolino in modo da immergere completamente lo scambiatore di calore e chiudere il coperchio.

B.1 Scrivere la temperatura iniziale della Barretta #1 quando si trova sul tavolo. 0.1pt

Disconnettere dalla barretta il cavo per i sensori di temperatura. Rimuovere il tappo isolante e avvitare la Barretta #1 sul coperchio del pentolino. Riconnettere il cavo all'interfaccia digitale, come mostrato in Figura 5. Fare attenzione a non avvitare in maniera troppo stretta la barretta al coperchio.



Figura 5

- B.2** Disegnare lo schema di un circuito che permetta di dare potenza al riscaldatore e di misurare tale potenza. Il circuito deve contenere: l'alimentatore da 9V, il riscaldatore (già connesso alla barretta), il voltmetro, l'amperometro e i fili. Si possono usare i fili come interruttore per aprire e chiudere il circuito. 0.5pt

La conducibilità termica verrà misurata riscaldando un estremo della barretta e tenendo nel frattempo l'altro estremo alla temperatura approssimativamente costante dell'acqua nel contenitore.

Si vuole arrivare vicini a uno stato stazionario per tutti i termometri. Realizzare il circuito della sezione B2 e accendere il riscaldatore.

- B.3** Effettuare le misure necessarie a determinare la potenza P applicata al riscaldatore e scriverne il valore nel foglio risposte. 0.1pt

Aspettare 15 minuti lasciando il riscaldatore acceso (si può usare questo tempo per pianificare le altre fasi).

- B.4** Scrivere nella tabella fornita le temperature di tutti gli 8 termometri ai tempi approssimativamente di: 15 min, 17,5 min, 20 min. 0.5pt

- B.5** Disegnare sulla carta millimetrata tre grafici della temperatura in funzione della posizione uno per ognuno dei tempi misurati. Questi grafici verranno anche usati nella Parte D. 1.0pt

- B.6** Usare il grafico per ricavare la conducibilità termica del rame, κ_0 , usando i dati al tempo di approssimativamente 17,5 min. In questa parte trascurare ogni perdita di calore. Stimare la velocità media di cambiamento della temperatura nella barretta, $\frac{\Delta T}{\Delta t}$, al tempo di approssimativamente 17,5 min. 0.5pt

- B.7** Il valore misurato κ_0 sarà maggiore, minore o uguale al valore reale κ ? 0.3pt

Parte C: Stima della dispersione di calore e del calore specifico del rame (4.0 punti)

Premesse teoriche

La capacità termica C di un corpo è definita come segue

$$\Delta Q = C \Delta T, \quad \frac{\Delta Q}{\Delta t} = C \left(\frac{\Delta T}{\Delta t} \right). \quad (3)$$

Qui, $\Delta Q / \Delta t$ è la potenza termica netta trasferita alla barretta e $\Delta T / \Delta t$ il tasso di variazione della temperatura. Il calore specifico c_p è la capacità termica per unità di massa. La massa della barretta di rame è di 0.58 kg.



Esperimento

Spegnere l'alimentatore del riscaldatore. Disconnettere il circuito, svitare la Barretta #1 e riporla sul tavolo. Porre il tappo isolante sulla barretta, come l'hai trovata all'inizio dell'esperimento. Collegare nuovamente il circuito col riscaldatore e la barretta all'interfaccia digitale.

ATTENZIONE: in questa parte non lasciare il riscaldatore connesso per lunghi periodi senza controllare la temperatura.

Usando una sequenza di raffreddamento, riscaldamento e nuovo raffreddamento, possiamo derivare sia la dispersione di calore che la capacità termica della barretta. La fase di riscaldamento deve aumentare la temperatura di approssimativamente 2.5°C . L'accuratezza necessaria in questa fase può essere raggiunta con una sequenza raffreddamento-riscaldamento-raffreddamento di circa 10-15 minuti in totale.

Qui lo scopo è quello di lavorare vicino al valore medio delle temperature misurate nella Parte B.

Per misurare l'energia assorbita dalla barretta, dobbiamo misurare la sua temperatura media. La temperatura nel centro della barretta può essere considerata come una buona approssimazione della sua temperatura media.

| | | |
|------------|--|-------|
| C.1 | Effettuare una sequenza di raffreddamento-riscaldamento-raffreddamento e riportare le misure nella tabella C1 al fine di ricavare la temperatura media. | 1.0pt |
| C.2 | Su carta millimetrata, tracciare un grafico della temperatura media in funzione del tempo | 1.0pt |
| C.3 | Usando il grafico, calcolare il calore specifico c_p e il calore disperso per unità di tempo P_{loss} vicino alla temperatura media della Parte B. Descrivi il metodo usando diagrammi ed equazioni. | 1.0pt |

Per migliorare l'accuratezza della determinazione della conducibilità termica realizzata nella parte B, è necessario tenere conto principalmente di due aspetti:

- è presente una dispersione termica in direzione radiale attraverso il materiale isolante
- il sistema non ha ancora raggiunto lo stato stazionario nel momento della misura

In una approssimazione al prim'ordine, si può assumere che a causa di ciascuno di questi due aspetti, la variazione della potenza trasferita per unità di lunghezza $\Delta P/\Delta x$ sia costante

| | | |
|------------|---|-------|
| C.4 | Scrivere un'equazione che corregga al prim'ordine la conducibilità termica trovata nella parte B, tenendo in considerazione entrambi gli aspetti. Usare $\kappa_0, P, c_p, m, P_{loss}, \frac{\Delta T}{\Delta t}$ ottenuti nelle parti B e C per esprimere il valore corretto della conducibilità termica del rame κ_{Copper} e calcolarlo numericamente. | 1.0pt |
|------------|---|-------|

Parte D: Conducibilità termica di ottone e alluminio (1.0 punti)

Connettere la barretta isolata #2 all'interfaccia digitale e calibrare i termometri di questa barretta come spiegato all'inizio della Parte B (mantenendo premuto il pulsante rosso, collegare il cavo della barretta #2 proveniente dai termometri all'interfaccia digitale).



D.1 Scrivere la temperatura iniziale della barretta quando si trova sul tavolo. 0.1pt

Disconnettere il cavo e avvitare la Barretta #2 sul coperchio del pentolino come mostrato in Figura 4. Riconnettere il cavo all'interfaccia digitale.

Ripetere la procedura usata nella parte B per avvicinarsi allo stato stazionario durante il riscaldamento.

Aspettare per almeno **15 minuti** mentre il riscaldatore è acceso prima di iniziare a prendere le misure.

Si può assumere, per l'accuratezza richiesta in questa parte, che la barretta sia in uno stato stazionario. Inoltre si può assumere che la perdita di calore per unità di lunghezza sia uniforme lungo la barretta.

D.2 Scrivere le letture di temperatura di tutti gli 8 termometri della Barretta #2 e scrivere $\Delta T / \Delta x$ per ognuna delle sue sezioni. 0.2pt

Come approssimazione al prim'ordine, si può utilizzare la stessa assunzione della domanda C.4, cioè che $\Delta P(x) / \Delta x$ è uniforme.

D.3 Esprimere κ_{Ottone} e $\kappa_{\text{Alluminio}}$ usando le misurazioni precedenti e calcolare i loro valori numerici. 0.7pt

Parte E: La legge di Wiedemann-Franz (0.5 punti)

Secondo la legge di Wiedemann-Franz, nei metalli in cui il trasporto di calore è dovuto soprattutto agli elettroni di conduzione, il rapporto tra la conducibilità termica e la conduttività elettrica dipende linearmente dalla temperatura assoluta. Inoltre, la legge dice che la grandezza $L = \frac{\kappa}{\sigma T}$ (nota come "numero di Lorenz") è la stessa per molti metalli, e dipende solo da costanti universali. In realtà, per metalli a temperatura ambiente, questa legge vale entro circa il 10% di accuratezza.

E.1 Scrivere nella tabella E1 i valori trovati della conducibilità termica e della conduttività elettrica (κ, σ). Calcolare il valore di L per ogni materiale e scriverlo nella stessa tabella E1, assumendo che, al prim'ordine, la conducibilità termica non dipenda dalla temperatura. 0.5pt