

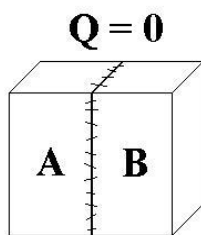


LEZIONE # 18

Tutti noi abbiamo imparato fin dall'infanzia che i corpi che hanno una temperatura alta *scottano* ed è bene non toccarli con le mani. Eppure, per quanto intuitiva possa apparire la "grandezza fisica temperatura", per essa non esiste un *unico campione* di riferimento, come invece avviene per le altre grandezze fisiche in ogni sistema di unità di misura che si voglia considerare. La misura della temperatura, infatti, si effettua per mezzo di opportuni strumenti tarati. Poiché il risultato della misura di temperatura è comunque un *numero*, occorre comprendere l'*origine* e il *significato* di questo numero.

La prima osservazione fondamentale è che, se ad un corpo viene fornito o sottratto del **calore Q** , si modifica la sua **temperatura T** . Il calore Q (che è un'**energia** e si misura in **Joule**) altera l'attività molecolare dei corpi, provocando la variazione della temperatura T . Ne consegue immediatamente che la temperatura è una *grandezza di stato* che fornisce una informazione circa lo "stato energetico" del corpo.

Ci si chiede ora: come è possibile stabilire una *scala di temperatura* ed un *numero di riferimento* che abbia un valore o un significato indipendente da ogni particolare condizione sperimentale ?



Per cominciare è possibile fare riferimento alla **legge zero della termodinamica** che recita: se c'è equilibrio termico, ovvero non c'è passaggio di calore Q tra due corpi A e B posti a contatto, i corpi A e B sono alla stessa temperatura !

La proprietà appena enunciata è *transitiva*: se c'è equilibrio termico tra i corpi A e B e tra i corpi B e C, c'è anche equilibrio termico tra i corpi A e C.

Figura 18.1

Questo principio rappresenta già un *metodo* per la misura della temperatura: il *contatto* tra un corpo e il "corpo campione", quando si trovano alla medesima temperatura (vedi seguito).

E' ben noto che la variazione della temperatura causa diversi effetti sui corpi, tutti legati alla variazione della attività molecolare richiamata prima:

- variano le *dimensioni fisiche* \rightarrow il volume ΔV o la lunghezza Δl , a seconda della forma del corpo;
- variano le *proprietà elettriche* \rightarrow la resistenza ΔR ;
- varia lo *stato fisico* \rightarrow da solido a liquido a vapore o viceversa, utilissimo per definire le T di riferimento (vedi seguito).

L'intensità di questi effetti dipende fortemente dalla *forma* e dal *materiale* di cui sono costituiti i corpi. Anche le modalità di osservazione degli effetti sono piuttosto convenzionali. Eppure, nella pratica essi costituiscono i *metodi operativi* per la misura della temperatura. La definizione della scala delle temperature, invece, deve fare riferimento a *leggi ideali*. La **scala termodinamica delle temperature** fu definita da lord Kelvin nel 1848 ed è tutt'oggi la base teorica della scala di temperature.

Come rappresentato nella figura 18.2, una *macchina termica perfettamente reversibile* assorbe una quantità di calore Q_1 dalla sorgente ideale a temperatura T_1 e cede la quantità di calore Q_2 alla sorgente ideale a temperatura T_2 .

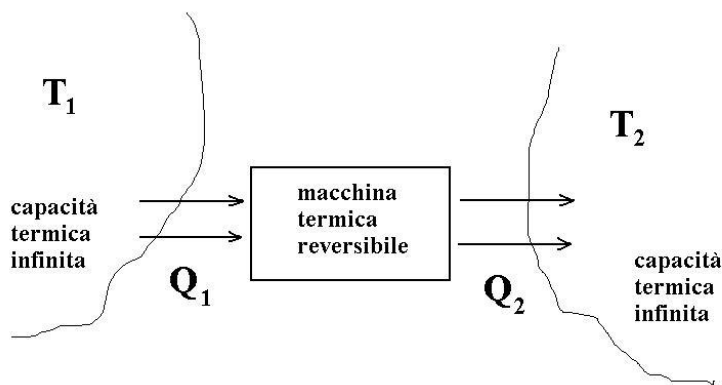


Figura 18.2

Vale la relazione del **ciclo di Carnot**:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad \text{ovvero} \quad T_2 = \frac{Q_2}{Q_1} \cdot T_1.$$

A questo punto, basterebbe individuare una condizione di riferimento a temperatura T_1 (ad es. il punto triplo dell'acqua) per poter tracciare la scala delle temperature, misurando i rapporti Q_2/Q_1 .

Purtroppo, la *macchina perfettamente reversibile del ciclo di Carnot ideale* "non esiste".

Si pensò allora di fare riferimento a qualcosa che potesse sostituire la macchina termica ideale: il *termometro a gas perfetto*, per il quale vale la relazione $pV = nRT$. Un tale strumento, fatto funzionare a pressione p costante, potrebbe consentire di mettere in relazione le variazioni di volume con le variazioni di temperatura $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$ oppure, fatto funzionare a volume V costante, potrebbe consentire di mettere in relazione le variazioni di pressione con le variazioni di temperatura $\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$. Ma, anche il *gas perfetto* è una astrazione !

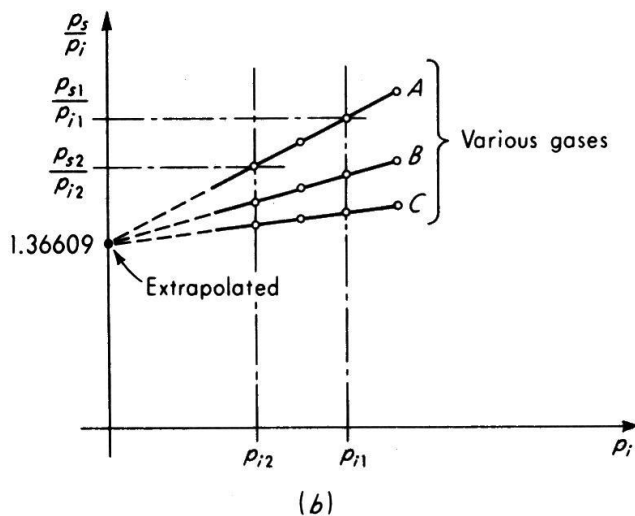
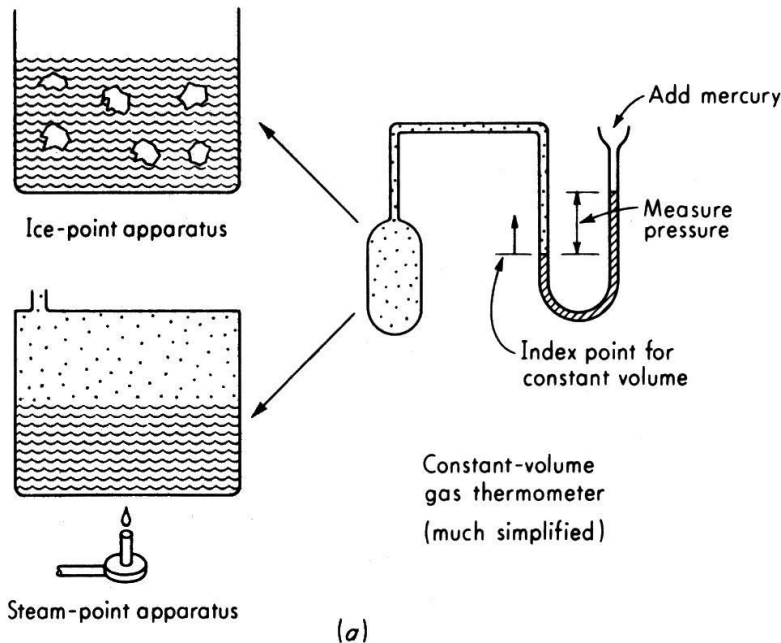
È possibile però, utilizzare il *termometro a gas reale rarefatto* e procedere per estrapolazione. Con riferimento all'esperimento rappresentato sotto nella figura 18.3, si consideri di avere a disposizione un termometro a gas rarefatto, un ambiente con ghiaccio fondente (a 0°C) e un ambiente con acqua in ebollizione (a 100°C) alla pressione di una atmosfera standard.

Il termometro a gas rarefatto viene fatto funzionare a volume V costante. L'ampolla contenente il gas viene immersa nel ghiaccio fondente, viene stabilito un volume costante di riferimento e viene misurata la pressione p_{i1} ($i = \text{ice}$). Successivamente, l'ampolla viene immersa nell'acqua bollente. Alla temperatura più alta, il gas tende ad espandersi. Se il volume viene mantenuto costante, si misura una pressione più alta p_{s1} ($s = \text{steam}$). Il rapporto $p_{s1}/p_{i1} > 1$ viene riportato sul grafico in funzione della situazione di riferimento p_{i1} . Per approssimare meglio le condizioni di gas ideale, si estrae ora parte del gas dall'ampolla, in modo da ottenere un gas ancora più rarefatto. In queste nuove condizioni si ripete la procedura appena esposta facendo espandere il gas al medesimo volume di prima, si misurano le due pressioni p_{i2} e p_{s2} nelle due condizioni di sopra e si riporta sul grafico il rapporto $p_{s2}/p_{i2} > 1$ in funzione della nuova pressione di riferimento p_{i2} .

Si osservi che sia la p_{i2} che il rapporto p_{s2}/p_{i2} hanno valori più bassi dei corrispondenti valori del caso precedente. La cosa non dovrebbe sorprendere: il gas è più rarefatto. Si può pensare di procedere ulteriormente secondo questa strada, estraendo altro gas dall'ampolla e tracciando altri punti sul grafico. Fin tanto che ciò risulta possibile, si osserva sul grafico che i punti dei rapporti p_s/p_i si dispongono su di una retta inclinata, come la retta A in figura 18.3. Ad un certo punto però, la rarefazione del gas sarà tale che non sarà più tecnicamente possibile misurare i rapporti di pressione p_s/p_i . Potrebbe sorgere il dubbio legittimo che l'esito di questa esperienza, ovvero l'inclinazione della retta A, dipende dal tipo di gas che si è deciso di utilizzare. Quando si decidesse di ripetere pedissequamente tutti i passaggi dell'esperienza appena descritta con un gas di tipo diverso, il dubbio verrebbe "confermato". Il risultato che si osserverebbe sul grafico sarebbe una



retta inclinata come la retta B o come la retta C della figura di sotto. Per avvalorare quanto si sta per affermare, anzi, si “devono” effettuare più esperimenti, ciascuno con un gas di tipo diverso.



Gas-thermometer temperature scale.

Figura 18.3

Ogni altro valore numerico che si scegliesse per T_i romperebbe l'equivalenza istituita tra le unità di temperatura **grado Kelvin** [K] e **grado Celsius** [°C].

In conclusione si può affermare che la scala delle temperature termodinamiche, anche se ha una base teorica, in virtù della scelta del valore della T_i di riferimento e dell'unità di temperatura termodinamica coincidente con il grado Celsius, è anch'essa del tutto convenzionale !

La misura operativa della temperatura quindi viene effettuata per mezzo di strumenti tarati. Del **termometro a mercurio** è già stata ricavata la curva di graduazione ed è stata calcolata la sensibilità.

Se ora si prolungano verso la sinistra del grafico le rette ottenute con diversi tipi di gas rarefatto, si osserva che esse vanno tutte ad intersecare l'asse delle ordinate nel medesimo punto indicato con $p_s/p_i = 1.36609$. Si tratta di un valore *estrapolato*, giacché corrisponde al rapporto che si avrebbe con riferimento alla condizione $p_i = 0$, la condizione di *gas perfetto*, appunto. Si osservi che il risultato estrapolato per questa condizione limite non dipende dal particolare gas impiegato.

Per tale condizione limite (o anche ideale) è possibile scrivere:

$$\frac{T_s}{T_i} = \frac{p_s}{p_i} = 1.36609$$

Se ora si desidera istituire una scala di temperature che suddivida l'intervallo di temperatura tra le due condizioni di ghiaccio fondente ed acqua bollente, usate nell'esperienza di sopra, nei classici *100 gradi* impiegati nella scala convenzionale e storica di Celsius, si deve scegliere per la temperatura di riferimento T_i il valore numerico convenzionale di **273,16**. In questo modo risulta infatti:

$$T_s = 1.36609 \times 273.16 = 373.16$$

quindi $1K \equiv 1^\circ C$.

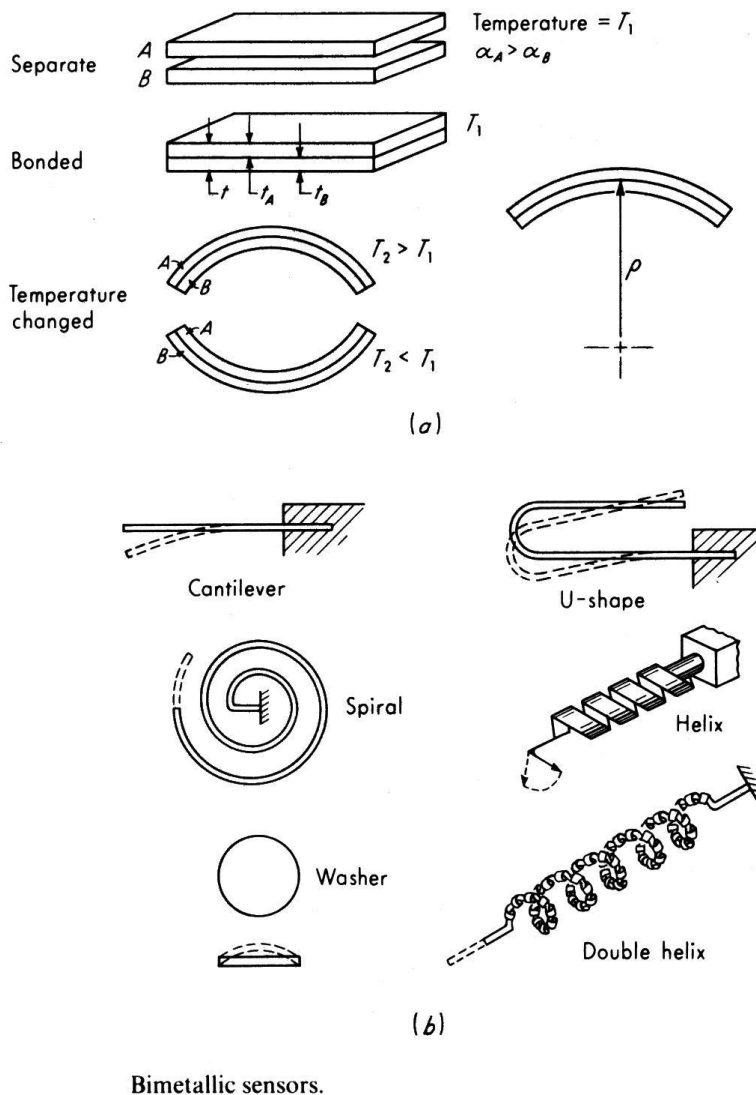


Si tratta di uno strumento semplice ed usatissimo che si basa sull'effetto della dilatazione volumetrica ΔV di un liquido termometrico, il mercurio, appunto.

Per la taratura di tutti i termometri industriali, la Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure nel 1968 indicò *sei punti fissi di temperatura*, definiti come temperature di equilibrio fra 2 fasi solido/liquido/vapore alla pressione di 1 Atmosfera standard (101325 Pa).

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1. punto dell'ossigeno (-182.96°C): | T di equilibrio tra $O_{(L)}$ e $O_{(V)}$ |
| 2. punto triplo dell'acqua (+0.01°C): | T di equilibrio tra $H_2O_{(S)}$, $H_2O_{(L)}$, $H_2O_{(V)}$ |
| 3. punto del vapore d'acqua (+100°C): | T di equilibrio tra $H_2O_{(L)}$ e $H_2O_{(V)}$ |
| 4. punto dello zinco (+419.58°C): | T di equilibrio tra $Zn_{(S)}$ e $Zn_{(L)}$ |
| 5. punto dell'argento (+961.93°C): | T di equilibrio tra $Ag_{(S)}$ e $Ag_{(L)}$ |
| 6. punto dell'oro (+1064.43°C): | T di equilibrio tra $Au_{(S)}$ e $Au_{(L)}$ |

A questi sei "punti fissi principali" le norme aggiungono altri 23 punti secondari e prescrivono dettagliatamente le modalità di taratura.



Una categoria di termometri industriali usati non solo per l'indicazione del valore di temperatura sono i **termometri bimetallici**. Questi dispositivi sono costituiti da due lamine di materiale diverso unite l'una sull'altra. Quando il dispositivo viene posto in un ambiente dove la temperatura varia, in virtù dei diversi coefficienti di espansione termica, nelle due lamine unite si viene a creare uno *stato tensionale differenziale* che agisce al livello della giunzione dei due metalli e produce l'incurvamento delle due lamine unite.

La forza sviluppata dal dispositivo durante il piegamento è tale che negli impianti industriali e civili viene utilizzato principalmente come interruttore termico di sicurezza. Alcuni esempi di termometri bimetallici sono riportati nella figura 18.4 di lato.

Ma quando si tratta di effettuare la misura della temperatura per ottenere il valore numerico di T , per quei motivi di comodità tante volte richiamati, si ricorre soprattutto ai **termometri elettrici**.

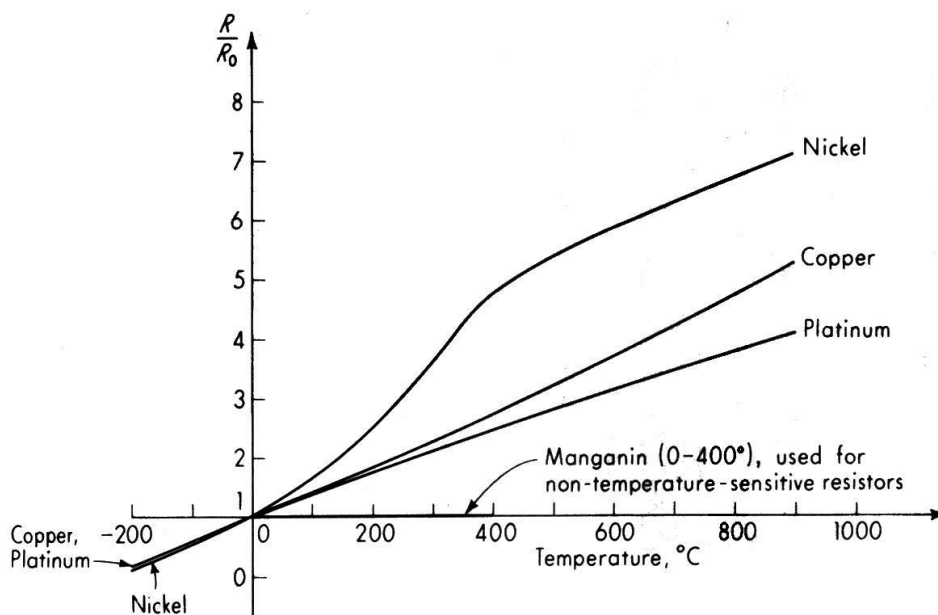
Figura 18.4



Questi sono dispositivi piccoli, rapidi ed anche sufficientemente precisi, in grado di seguire bene la maggior parte dei fenomeni nei quali varia la T . Come tutti i trasduttori elettrici, permettono una facile manipolazione del segnale.

I **termometri a variazione di resistenza (RTD)** sono basati sulla variazione di R in funzione della temperatura T . Contrariamente a quanto generalmente si suppone, la legge fisica della variazione in questione non è lineare: $R_T = R_0(1 + \alpha\Delta T + \beta\Delta T^2 + \gamma\Delta T^3 + \dots)$

Nella figura 18.5 sotto sono riportati alcuni andamenti tipici della dipendenza funzionale $R=R(T)$ per alcuni dei materiali impiegati più comunemente allo scopo.



Resistance/temperature curves.

Figura 18.5

Si riconosce che, tra tutti i metalli, il “platino” è quello che manifesta un comportamento *lineare* per il campo di temperature più esteso.

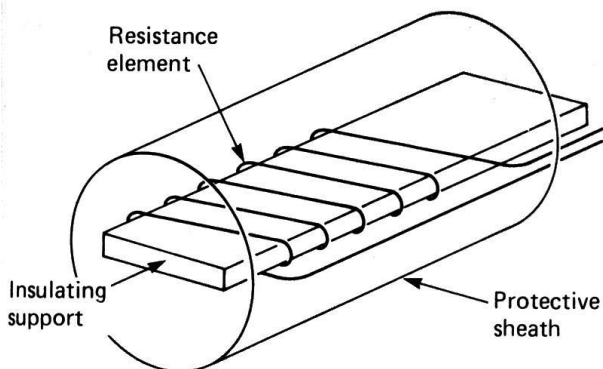


Figura 18.6

Solo entro i limiti del campo di linearità è possibile approssimare la relazione completa con quella troncata al primo termine: $R_T = R_0(1 + \alpha\Delta T)$ dove R_0 è la resistenza di base a 0°C . Il coefficiente $\alpha = \frac{\Delta R}{R \cdot \Delta T} [^\circ\text{C}^{-1}]$ deve essere determinato per l'intervallo ΔT di linearità e, a rigore, è valido solo per esso.

Uno schema costruttivo molto comune per il termometro a variazione di resistenza al platino (*Pt100*) è quello con il filo a spirale avvolto su di un supporto e racchiuso in un involucro protettivo.

Un disegno rappresentativo del montaggio è riportato sopra nella figura 18.6. Considerato anche il materiale di pregio impiegato per la costruzione delle Pt100, si comprende facilmente che questi non sono trasduttori propriamente economici e sono venduti corredati delle tabelle di graduazione. Per quanto attiene le qualità metrologiche, si tenga presente che, nelle applicazioni del settore industriale, le Pt100 sono considerati “termometri di riferimento”.

Il *campo di misura* è ampio, la *sensibilità* ottima e la *precisione* molto spinta. I termometri a variazione di resistenza, a meno di non essere miniaturizzati, non sono però trasduttori *rapidi* ed hanno costanti di tempo λ che possono risultare anche di parecchi secondi.

Per non “sciupare” le notevoli precisioni messe a disposizione da questi trasduttori, occorre fare attenzione a come si collegano le Pt100, e i termometri RTD in genere, allo stadio per la manipolazione del segnale che segue nella catena di misura.

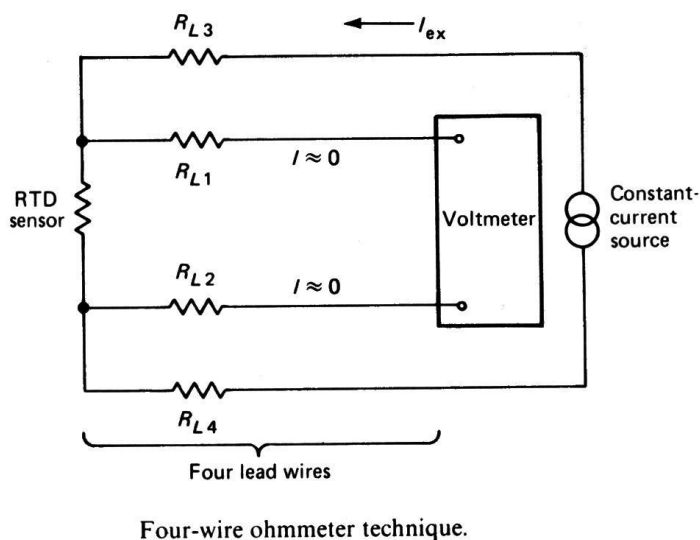
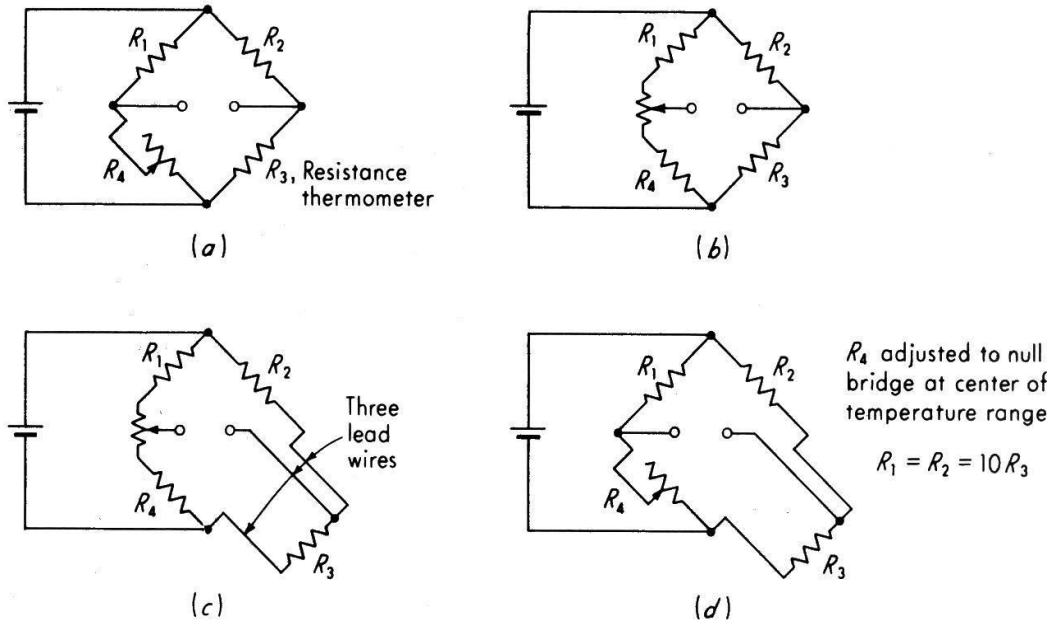


Figura 18.7

Se si sceglie di misurare la variazione della resistenza R con un *metodo volt-amperometrico*, si deve optare per il collegamento a 4 fili, riportato in figura 18.7, in modo da escludere dalla misura della resistenza il contributo della variazione della resistenza dei fili di collegamento.

Si deve fare attenzione inoltre a non alimentare i trasduttori RTD con correnti troppo elevate, questo per non incorrere nel rischio di alterare la temperatura del trasduttore dall'interno, a causa del riscaldamento del filo per effetto Joule. La giusta corrente di alimentazione, generalmente, viene prescritta dal costruttore.

Per minimizzare gli effetti dovuti alla corrente di alimentazione e, soprattutto, quando le variazioni della temperatura T da misurare sono piccole, si preferisce collegare i trasduttori RTD al ponte di Wheatstone. Si osservi che, anche qui, per compensare gli effetti termici sui fili di collegamento, è consigliabile scegliere un collegamento a 3 fili, in modo da ripartire la variazione termica di resistenza dei fili su due rami contigui, e quindi “eliderli”, come mostrato sotto nella figura 18.8 (c) e (d).



Resistance-thermometer bridge circuits.

Figura 18.8

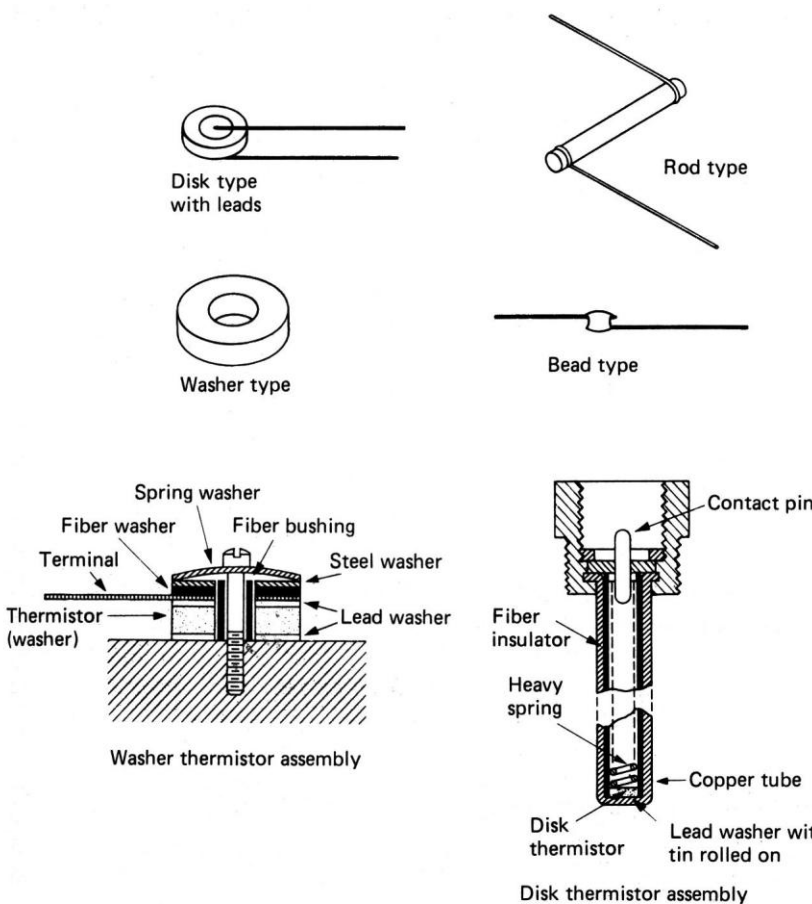


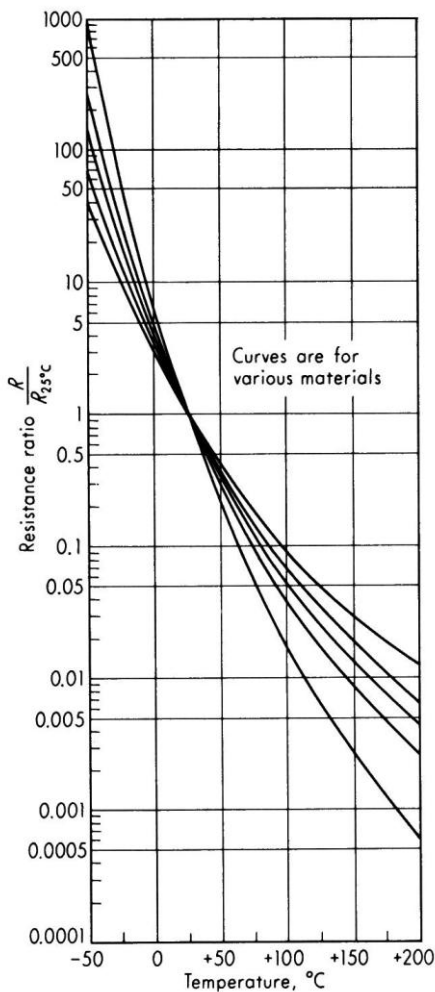
Figura 18.9

Un'altra categoria di trasduttori elettrici sono i **termometri a semiconduttore** o **termistori**. Questi sono trasduttori *sensibili ma poco precisi* quindi, decisamente economici. La loro *rapidità* dipende in gran parte dalla massa del semiconduttore, ovvero dall'inerzia termica dell'elemento sensibile. Alcuni esempi di termistori sono riportati in figura 18.9.

La *curva di graduazione* dei termistori non è lineare e, qualunque sia la soluzione costruttiva, si ha per essi la stessa legge fisica:

$$R_T = R_0 \cdot e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

dove R_T e T sono la resistenza e la temperatura incognite, R_0 e T_0 sono la resistenza e la temperatura di riferimento e β



Thermistor resistance/temperature curves.

Figura 18.10

è il *coefficiente di temperatura*, che deve essere determinato per ogni termistore. Infatti, essendo questi trasduttori piuttosto economici, non sono venduti corredati con le tabelle di graduazione. Si riconosce nella figura 18.10 a lato, che la resistenza R del termistore diminuisce fortemente con l'aumentare della temperatura T .

Per la determinazione preventiva del coefficiente β occorre dotarsi di due punti di temperatura fissi T_0 e T_1 , compresi nel campo di misura del trasduttore, e misurare le resistenze in corrispondenza di tali punti:

$$\beta = \frac{T_1 T_0}{T_0 - T_1} \cdot \ln \frac{R_1}{R_0}$$

I termistori producono in funzione della variazione di temperatura variazioni di resistenza "ragguardevoli", se confrontate con quelle degli RTD. Tale circostanza consente di collegare i termistori a dei semplici Ohmmetri, anche solo con "due fili", senza per questo rischiare di compromettere la precisione della misura, che di per se non è particolarmente elevata.

Il sensore elettrico di gran lunga più diffuso in ambito industriale e civile per la misura della temperatura è la **termocoppia**. Si tratta di un *trasduttore attivo* che non ha bisogno di essere alimentato. In uscita dalla termocoppia si ottiene una piccola *forza elettromotrice* E direttamente proporzionale ad una differenza di temperatura ΔT . In realtà, oltre ad essere un trasduttore, la termocoppia è un vero e proprio *circuito elettrico*, costituito da due fili di materiale "diverso", uniti in due punti del circuito che prendono il nome di **giunzioni**.

Con riferimento alla figura 18.11 di sotto, nel circuito a sinistra si hanno, ad esempio, *rame* e *costantana* a contatto nei punti indicati con A e B. La temperatura nei punti A e B è la medesima: $T_A = T_B$. Il circuito è completato da uno strumento per la misura dei potenziali.

Si immagini ora di percorrere idealmente il circuito, partendo dal filo di rame a sinistra e di misurare strada facendo i *potenziali intrinseci*. Lungo tutta la lunghezza del tratto di rame si osserva un potenziale intrinseco E_{rame} costante. Arrivati alla giunzione A, si osserva un salto positivo del potenziale intrinseco $\Delta E = E_{cost} - E_{rame}$. Lungo il tratto di circuito di costantana il potenziale rimane ancora costante ma pari a E_{cost} . In corrispondenza della giunzione B si osserva un nuovo salto di potenziale $\Delta E = E_{rame} - E_{cost} < 0$ identico a prima ma negativo. Poiché il potenziale lungo il secondo tratto di rame E_{rame} non varia, alla fine del percorso il millivoltmetro misura una differenza di potenziale totale nulla.

Si immagini ora che la temperatura nel giunto B sia aumentata a $T_B > T_A$ e si ripeta il percorso appena fatto. Fino al punto B tutto rimane come prima ma, arrivati in corrispondenza di B, si osserva un salto di potenziale più ampio, pari a $\Delta E + \Delta e$.

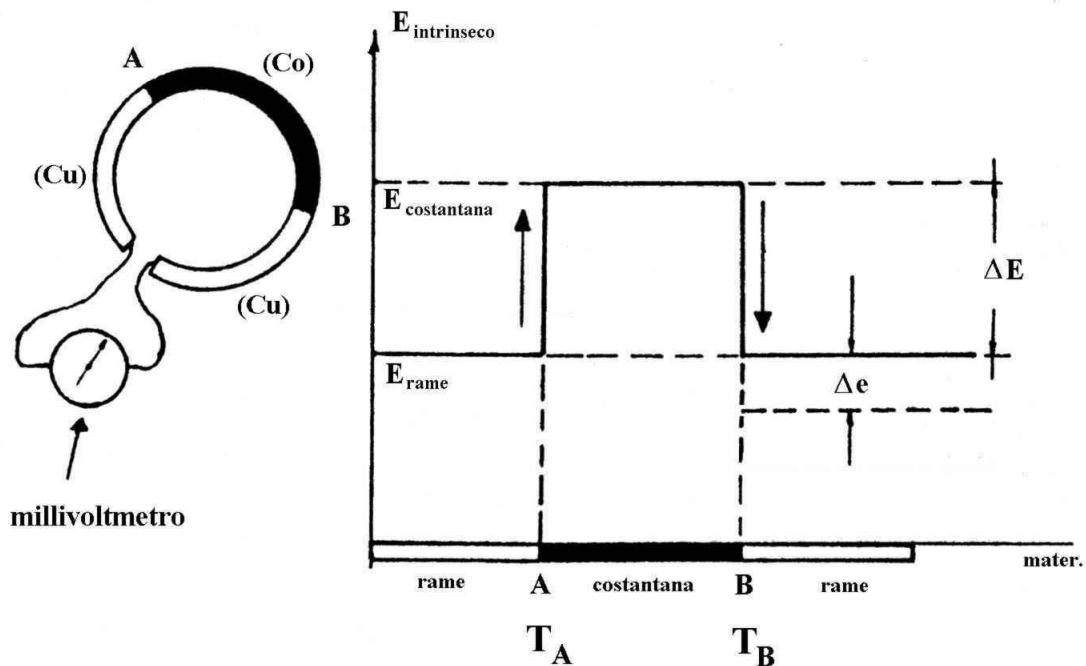


Figura 18.11

Il salto aggiuntivo Δe è dovuto agli **effetti termoelettrici** che agiscono nel circuito quando c'è una differenza di temperatura tra le due giunzioni. In particolare, Δe è la **forza elettromotrice** che si sviluppa sulla giunzione B in virtù di un "apporto di energia" dall'esterno: il calore Q che scalda la giunzione e la porta alla temperatura $T_B > T_A$. Gli effetti termoelettrici sono il risultato del flusso simultaneo del calore e delle cariche elettriche nei conduttori. Una descrizione matematica rigorosa richiederebbe il ricorso all'entropia termodinamica. Fortunatamente, per comprendere le modalità di utilizzo delle termocoppie ciò non è indispensabile. Il principio di funzionamento delle termocoppie può essere spiegato qualitativamente facendo riferimento a tre effetti termoelettrici di base:

1. **effetto SEEBECK**: alle giunzioni di due materiali metallici isoterma si stabilisce una differenza di potenziale. Per le termocoppie si tratta dell'**effetto fondamentale**, ed è anche quello che origina il Δe quando le due giunzioni non sono alla stessa temperatura. Si faccia bene attenzione che il potenziale Δe dovuto all'effetto Seebeck deve essere misurato a **circuito aperto**, ovvero senza scorrimento di corrente nel circuito della termocoppia.

Il rapporto tra il Δe e la differenza di temperatura (non troppo elevata) tra le giunzioni $T_B - T_A$ è costante e può essere schematizzato per mezzo del **coefficiente di Seebeck**:

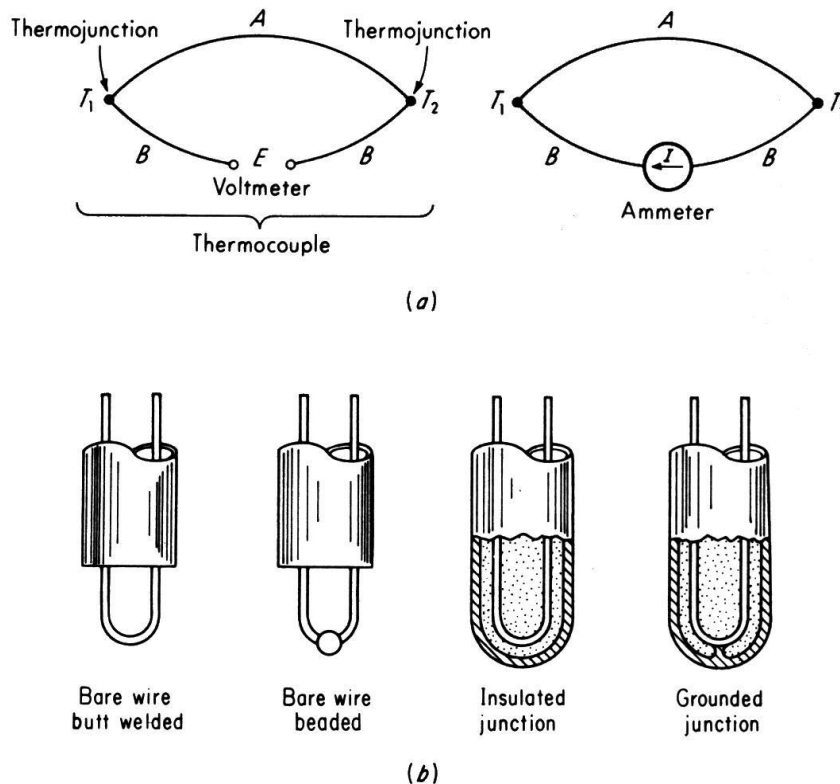
$$\pi_{AB} = \left[\frac{\partial e}{\partial T} \right]_{\text{circuitto aperto}} \text{ che poi è anche la } \textit{sensibilità} \text{ intrinseca del trasduttore !}$$

2. **effetto PELTIER**: se nel circuito della termocoppia con le giunzioni a temperatura $T_B > T_A$, quindi con $\Delta e \neq 0$, si consente la circolazione di corrente elettrica, questa tende a ristabilire l'equilibrio termico, raffreddando il giunto B a temperatura più alta e riscaldando il giunto A a temperatura più bassa. Poiché in questo modo le temperature attorno alle due giunzioni vengono localmente alterate dallo stesso sensore, il quale si comporta come una "pompa di calore" elettrica in miniatura, ai fini della misura della T , l'effetto citato è un "disturbo". Si tenga presente che l'effetto Peltier è **reversibile** e viene impiegato nell'industria elettronica per costruire raffreddatori o riscaldatori di dimensioni anche ragguardevoli.



3. **effetto THOMSON**: se un conduttore non è isoterma su di esso compare un gradiente di potenziale. Anche l'effetto Thomson è legato alla circolazione della corrente, comunque è di entità molto inferiore ai primi due effetti sopra citati e, per quanto segue, in prima approssimazione può essere trascurato.

Uno schema di principio della termocoppia, con alcune realizzazioni pratiche di giunzioni sono riportate a titolo di esempio qui sotto nella figura 18.12.



Basic thermocouple and junction types.

Figura 18.12

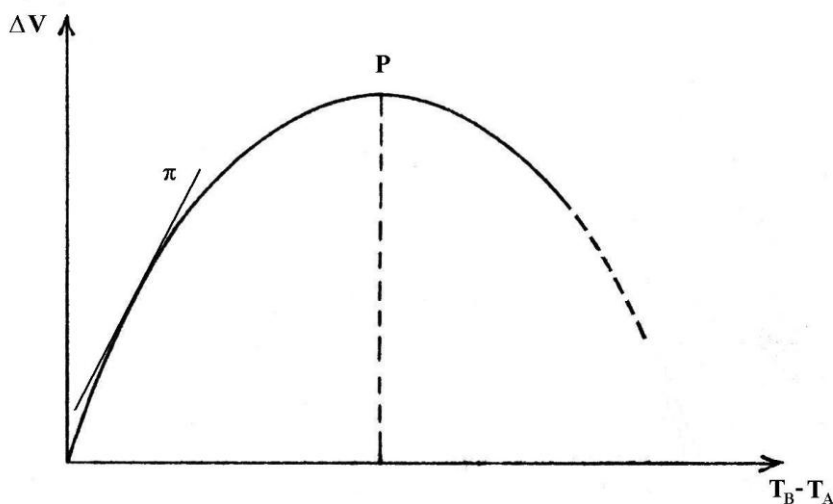


Figura 18.13

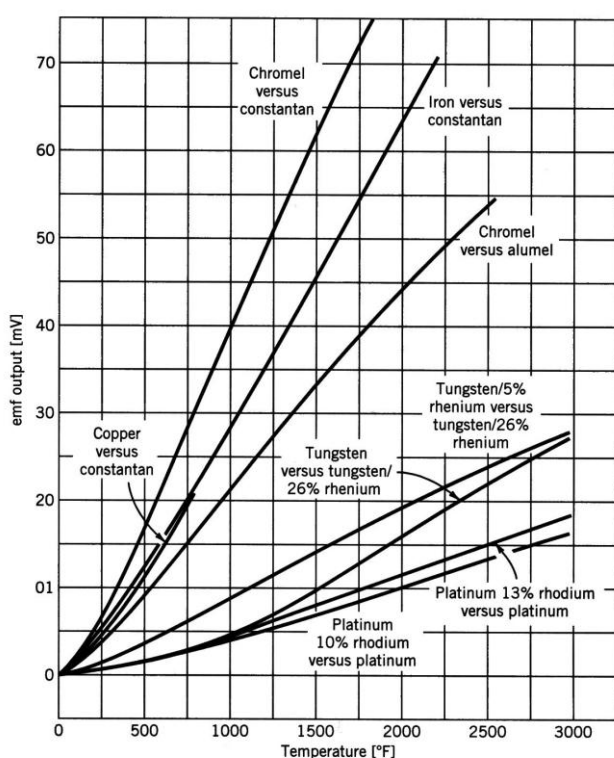
Stante la natura “qualitativa” delle spiegazioni addotte sul principio di funzionamento della termocoppia, la curva di graduazione viene sempre ottenuta attraverso la taratura di un certo numero di trasduttori. Purtroppo essa non risulta lineare, perciò i costruttori forniscono delle tabelle con i corrispondenti valori di *forza elettromotrice* in funzione della temperatura. La curva di graduazione



rappresentata in figura 18.13 indica che la termocoppia può essere utilizzata fino al punto P, oltre il quale i fenomeni di “saturazione termoelettrica” farebbero perdere la biunivocità.

Se il campo di variazione della temperatura è piccolo, (poche decine di °C) è possibile approssimare localmente la curva di graduazione con la sua tangente: il **potere termoelettrico** π .
 Il parametro π è la *sensibilità locale* della termocoppia e, in assenza di corrente che circola nel circuito, coincide con il coefficiente di Seebeck.

Esistono diversi tipi di termocoppie che si differenziano sostanzialmente nel materiale usato per i due fili. Nelle applicazioni pratiche il *tipo* di termocoppia è standardizzato ed è indicato convenzionalmente con le lettere maiuscole dell’alfabeto.



Thermocouple voltage output as a function of temperature for some common thermocouple materials. Reference junction is at 0°C. (From R. P. Benedict, *Fundamentals of Temperature, Pressure and Flow Measurements*, 3d ed., Wiley, New York, 1984)

Figura 18.14

Nell’uso normale (industriale) delle termocoppie, la temperatura di una delle due giunzioni (T_A) viene mantenuta costante e rappresenta la temperatura di riferimento. La giunzione in questione prende il nome di **giunto freddo**. La temperatura incognita viene misurata dall’altra giunzione (T_x) che prende il nome di **giunto caldo**. Si faccia attenzione al fatto che l’aggettivo *freddo* o *caldo* non ha nessuna relazione con la temperatura delle giunzioni in esercizio. Infatti, non è infrequente avere il giunto caldo che misura temperature inferiori a quella del giunto freddo.

Quando si effettua la misura, come già osservato nella figura 18.11 dei potenziali intrinseci, il circuito della termocoppia deve essere aperto per consentire l’inserimento di uno strumento di misura che rilevi la differenza di potenziale Δe .

Standard Thermocouple Compositions^a

Type	Wire		Expected Bias Error ^b
	Positive	Negative	
S	Platinum	Platinum/ 10% rhodium	±1.5°C or 0.25%
R	Platinum	Platinum/ 13% rhodium	±1.5°C
B	Platinum/ 30% rhodium	Platinum/ 6% rhodium	±0.5%
T	Copper	Constantan	±1.0°C or 0.75%
J	Iron	Constantan	±2.2°C or 0.75%
K	Chromel	Alumel	±2.2°C or 0.75%
E	Chromel	Constantan	±1.7°C or 0.5%

Alloy Designations

Constantan: 55% copper with 45% nickel

Chromel: 90% nickel with 10% chromium

Alumel: 94% nickel with 3% manganese, 2% aluminum, and 1% silicon

^aFrom Temperature Measurement ANSI PTC 19.3-1974.

^bUse greater value; these limits of error do not include installation errors.

Nella figura 18.14 a lato sono riportate le curve di graduazione, apparentemente lineari, per alcuni tipi di termocoppie commerciali.

I costruttori dispensano agli acquirenti le *tabelle di graduazione* per ogni tipo di termocoppia fornita; queste tabelle sono generalmente riferite alla temperatura di $T_0 = 0^\circ\text{C}$.

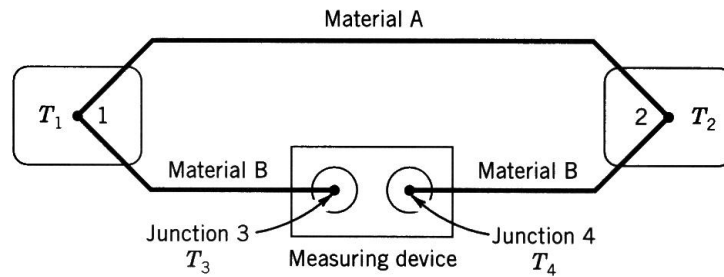
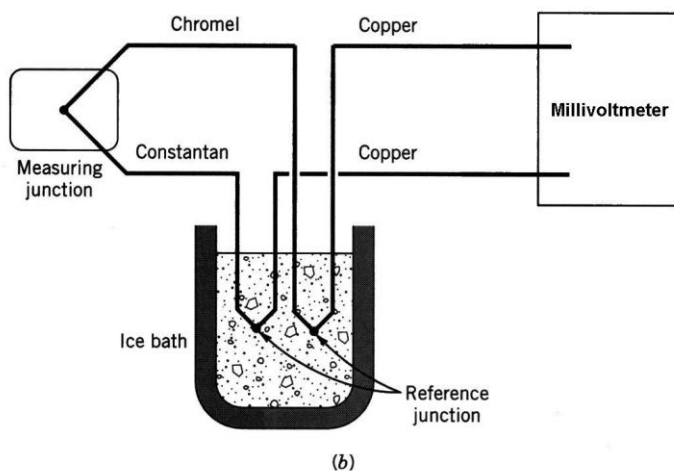
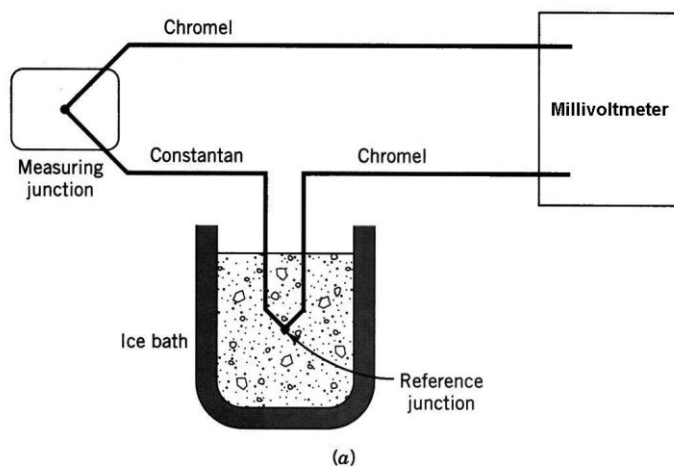


Figura 18.15

La situazione è illustrata nuovamente nella figura 18.15 qui sopra. Ma i *morsetti di contatto* o i *fili di collegamento* dello strumento non sono mai dello stesso identico materiale di cui sono costituiti i fili della termocoppia. Vengono quindi a crearsi due giunzioni supplementari, che devono essere mantenute alla stessa temperatura, in caso contrario, lo strumento misurerà un potenziale Δe che contiene un contributo spurio dato dalla “termocoppia supplementare”. Questa situazione, da tenere sempre presente nelle applicazioni reali, è nota con il nome di **1^a legge dei metalli intermedi**.



Thermocouple temperature measurement circuits.

Figura 18.16

Un circuito con il giunto freddo immerso in un bagno di acqua distillata in equilibrio col suo ghiaccio, è riportato a lato nella figura 18.16 (a). Per scongiurare l'incremento di potenziale dovuto alle forze elettromotrici “supplementari” che potrebbero svilupparsi ai punti di contatto con lo strumento di misura, si ricorre però al collegamento circuitale illustrato in figura 18.16 (b): si interrompe il circuito della termocoppia proprio sul giunto freddo ed ivi si saldano i fili di rame dello strumento. Il fatto che le due nuove giunzioni si trovino dentro ad un bagno di ghiaccio, ovvero in un ambiente a temperatura rigorosamente costante, mette al riparo dai rischi enunciati dalla legge dei metalli intermedi.

Essendo le tabelle di graduazione delle termocoppie riferite alla temperatura di $T_0 = 0^\circ\text{C}$, con la disposizione circuitale di figura 18.16 (b), dove il giunto freddo si trova proprio alla temperatura $T_0 = 0^\circ\text{C}$, basta leggere il valore di tensione indicato dallo strumento e convertire immediatamente la forza elettromotrice nel valore di temperatura indicata sulle tabelle a corredo.



Nelle applicazioni industriali però, quasi mai è ipotizzabile di poter disporre di un punto di riferimento termico affidabile a $T_0 = 0^\circ\text{C}$, come il bagno di ghiaccio fondente della figura 18.16. Gli strumenti industriali quindi, fanno riferimento alla disposizione circuitale con *giunto freddo a temperatura ambiente* o *giunto freddo elettronico* illustrata sotto nella figura 18.17.

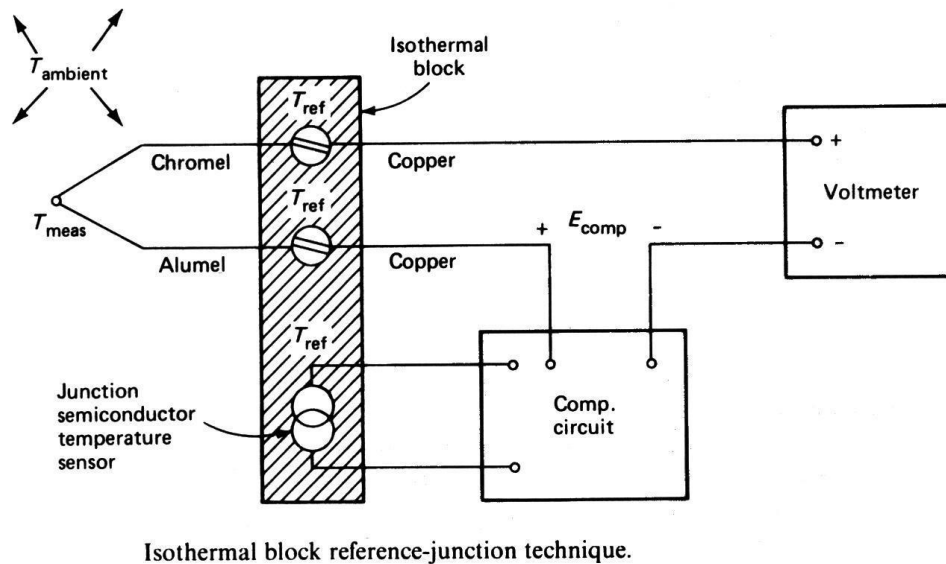


Figura 18.17

Come si vede, si rinuncia a mantenere il giunto freddo a $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ma si connettono i fili dello strumento ai fili della termocoppia per mezzo di un *blocchetto isoterma* che generalmente si trova a temperatura ambiente T_a . La temperatura del blocchetto è misurata con un altro termometro elettrico (un sensore di temperatura a semiconduttore) che invia il dato ad un circuito elettronico, il quale ha memorizzato al suo interno le curve di graduazione delle termocoppie. Nelle moderne centraline per termocoppie, il circuito elettronico può eseguire direttamente una compensazione in tensione (E_{comp}) del potenziale Δe misurato dalla termocoppia. La situazione appena illustrata è nota con il nome di **2^a legge delle temperature intermedie**.

esempio: se $T_{rif} = T_a \neq T_0 = 0^\circ\text{C}$

La termocoppia rileva un $\Delta e \propto T_x - T_a$ che non può essere interpretato direttamente sulle tabelle.

Il termometro a semiconduttore misura $T_{rif} = T_a$

Il circuito di compensazione elabora la $E_{comp} \propto T_a - T_0$ e la somma al Δe prodotto dalla termocoppia. Il voltmetro rileva la tensione compensata $E = \Delta e + E_{comp}$ che può essere interpretata sulle tabelle.

Si osservi che, stante la non linearità della curva di graduazione, anche quando la compensazione non fosse eseguita in automatico dallo strumento ma fosse fatta manualmente dall'utente, si devono "sommare i potenziali" e non i "valori di temperatura" che risultano dai potenziali parziali.

La termocoppia più *sensibile* è la *Fe-Co* con $S = 50\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, mentre la termocoppia *Pt-Rh* ha il *campo di misura* più esteso, con T comprese tra $-200^\circ\text{C} \div 1700^\circ\text{C}$. Per quanto attiene la *precisione*



si consideri che l'origine di tutti gli errori sulla misura della T è che il sensore può solamente denunciare la propria temperatura. Entro quali limiti questa sia anche la temperatura incognita, è una domanda che per avere una risposta soddisfacente richiede una attenta analisi caso per caso.

esempio: misura della T di un gas in un forno:

Il sensore riceve il calore dal gas contenuto nel forno principalmente per *convezione*, ma una quota parte potrebbe giungere all'elemento sensibile anche per *conduzione*, attraverso il supporto oppure, se per caso il sensore "vede" la fiamma del riscaldatore, addirittura per *irraggiamento*, dando luogo a imprecisioni notevoli ...

Note:

Figure 18.11, 18.13 courtesy of:
Branca F.P. – *Misure Meccaniche* – ed. ESA

Figure 18.3, 18.4, 18.5, 18.7, 18.8, 18.10, 18.12, 18.14, 18.15, 18.16, 18.17 courtesy of:
Doebelin E.O. – *Measurement systems, application and design* – McGraw Hill

Figure 18.6, 18.9 courtesy of:
Bechwith, Marangoni, Lienhard – *Mechanical Measurements* – Addison & Wesley