

## **TERMOCOPPIE**

Uno strumento di misura della temperatura molto diffuso nelle applicazioni industriali e basato su fenomenologie di tipo elettrico, è la termocoppia. Termine quest'ultimo con il quale si identifica una coppia di fili di metalli diversi congiunti tra loro generalmente mediante saldatura autogena. Tale giunto o coppia, inserito in un opportuno circuito genera, al variare della sua temperatura, una f.e.m. funzione della coppia di metalli utilizzati e della temperatura. Il più semplice circuito termoelettrico è quello ottenuto da due fili di metallo A e B con i giunti A-B e B-A immersi in due pozzetti a temperatura diversa  $T_1$  e  $T_0$ . La differenza di potenziale  $E_{A,B}$  che si rileva agli estremi è funzione della sola differenza  $T_1 - T_0$ .

E' possibile affermare che in un ampio campo di temperature  $-200 \div 600^\circ\text{C}$  l'impiego delle termocoppie è spesso alternativo alle più precise termoresistenze, rispetto alle quali le termocoppie presentano, sia migliori caratteristiche dinamiche (tempi di risposta dell'ordine dei decimi di secondi per giunto esposto e in acqua in movimento), sia un minore costo dell'elemento sensibile. Tra gli svantaggi si annoverano quello di misurare temperature non assolute ma relative (con conseguente necessità di un giunto di riferimento a temperatura nota) e quella di presentare un sensibile decadimento delle prestazioni metrologiche (e conseguentemente una bassa stabilità nel tempo).

Per temperature elevate le termocoppie si pongono, inoltre, in alternativa ai pirometri a radiazione totale e a quelli ottici. In questi ultimi due casi, come si vedrà nel seguito, gioca a favore delle termocoppie la semplicità del circuito di misura ed il minor costo, a sfavore la possibilità di un rapido deterioramento in particolari condizioni ambientali.

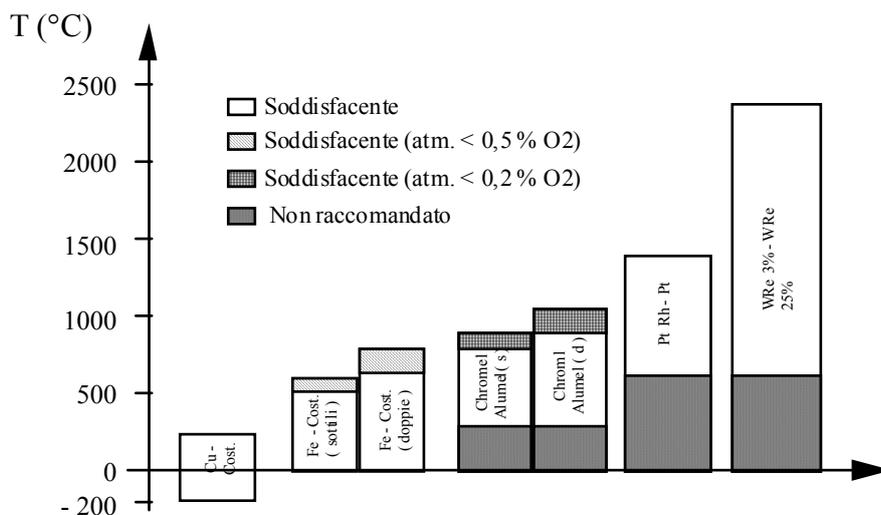


Fig VII.2 Campo di impiego delle principali termocoppie

In figura VII.1 sono riportati i possibili campi di applicazione delle termocoppie più in uso e le eventuali limitazioni per la presenza di atmosfere riducenti o ossidanti. Si noti che il campo di applicazione è anche legato al diametro dei fili costituenti la coppia, nel senso che fili di maggior diametro resistono meglio di quelli a fili sottili.

### 7.1 Leggi dei circuiti termoelettrici

Nel 1821 lo scienziato tedesco T.J. Seebeck descrisse i fenomeni collegati alla termoelettricità, cioè alla produzione di forza elettromotrice in un circuito costituito da metalli diversi quando i punti di giunzione vengono posti a differenti temperature. Le tre leggi fenomenologiche che descrivono la termoelettricità sono:

- 1) la legge di Seebeck, che lega il potenziale (la forza elettromotrice f.e.m.)  $E_S$  che si genera ai capi di un giunto di metalli diversi, alla temperatura  $T$  del giunto ed ai due metalli A-B costituenti il giunto stesso:

$$dE_S = \alpha_{A,B} \cdot dT \quad (VII.1)$$

dove  $\alpha_{A,B}$  rappresenta il coefficiente di Seebeck, più noto come potere termoelettrico della coppia A,B ed è funzione della sola temperatura T del giunto;

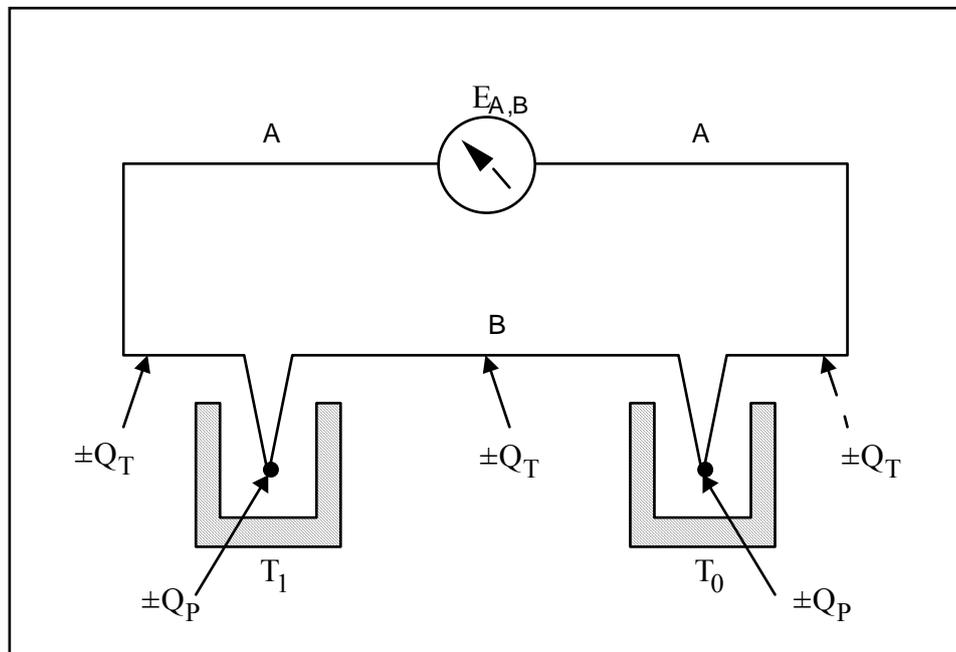


Fig. VII.2 Circuito termoelettrico

2) la legge di Peltier, che descrive l'assorbimento o la cessione di calore  $Q_p$  che avviene in un giunto di metalli diversi attraversato, in un verso o in quello opposto (reversibilmente), da una corrente I:

$$dQ_p = \pm \pi_{A,B} \cdot I \cdot d\theta \quad (\text{VII.2})$$

dove  $\pi_{A,B}$  rappresenta il coefficiente di Peltier, il cui valore dipende, per una determinata coppia A-B, dalla sola temperatura T del giunto. Il coefficiente  $\pi_{A,B}$  può variare in valore e segno al variare della T, nel senso che, a parità di verso della corrente I, in uno stesso giunto ci può essere assorbimento o cessione di calore  $Q_p$  a seconda della temperatura del giunto. Ovviamente esiste una temperatura T alla quale tale effetto è nullo. Sulla base della fenomenologia ad effetto Peltier descritta

sono stati sviluppate sistemi di raffreddamento di ridotta potenza il cui maggiore pregio, oltre alla sicurezza intrinseca, è quello di non presentare organi in movimento e quindi di non essere soggetti a fenomeni di usura. Tali dispositivi hanno trovato applicazione nel raffreddamento di ambienti di ridotte dimensioni e nella termostatazione di elementi nella strumentazione;

3) la legge di Thomson, che descrive l'assorbimento o la cessione di calore  $Q_T$ , che avviene in un conduttore omogeneo lungo il quale vi è un gradiente di temperatura, al passaggio di una corrente  $I$  (anche di tipo termoelettrico):

$$dQ_T = \pm \left[ \int_{T_1}^{T_2} \sigma dT \right] I d\theta \quad (\text{VII.3})$$

dove  $\sigma$  rappresenta il coefficiente di Thomson, il cui valore dipende dal materiale del conduttore, dal gradiente di temperatura e dalla temperatura stessa. Si noti che il coefficiente di Thomson viene spesso anche definito "calore specifico elettrico" in quanto rappresenta la quantità di calore ceduta od assorbita in un singolo conduttore sottoposto ad un gradiente unitario quando è percorso da una corrente unitaria.

I tre effetti su descritti sono tutti e tre presenti in un circuito termoelettrico a doppio giunto (uno di misura ed uno di riferimento) come quello in figura VII.2. In particolare per il circuito in oggetto si può scrivere la relazione che lega tra loro i tre effetti su descritti:

$$E_S = \pi_{A,B} \Big|_{T_2} - \pi_{A,B} \Big|_{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} \sigma_A dT - \int_{T_1}^{T_2} \sigma_B dT = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_{A,B} \cdot dT \quad (\text{VII.4})$$

La descrizione fenomenologica della termoelettricità data dalle tre leggi su esposte non definisce però in modo completo e chiaro la generazione della f.e.m. nei circuiti termoelettrici.

E' comunque possibile formulare leggi , che hanno ricevuto innumerevoli conferme sperimentali, che costituiscono la base per la utilizzazione delle termocoppie come strumenti di misura della temperatura.

Tab.VII.1 Potere termoelettrico rispetto al Platino  $\Delta S = \Delta E / \Delta T$  ( $\mu V/^{\circ}C$ )

Bismuto	-72	Alluminio	+ 3.5
Costantana	-35	Rodio	+ 7.0
Alumel	-15	Rame	+ 7.5
Nickel	-15	Ferro	+18.5

I<sup>a</sup> legge del circuito omogeneo

*In un circuito chiuso costituito da un solo materiale omogeneo non può circolare una corrente termoelettrica per mezzo di soli scambi termici.*

Ne consegue che, se in un circuito costituito da un solo materiale circola una corrente termoelettrica, essa è dovuta alla presenza di inomogeneità nel materiale che, sottoposte a gradienti di temperatura, generano f.e.m. termiche. Ed inoltre che, dato un circuito termoelettrico con due giunti a temperatura diversa, la f.e.m. generata è indipendente dalla distribuzione di temperatura lungo i fili supposti omogenei.

II<sup>a</sup> legge dei metalli intermedi

*La somma algebrica delle f.e.m. in un circuito costituito da un numero qualsiasi di metalli diversi è nulla se tutto il circuito è isoterma.*

Ne consegue che se un terzo metallo è inserito in un punto qualsiasi del circuito termoelettrico in esame e le estremità di tale metallo sono mantenute isoterme non si hanno variazioni di f.e.m..

Per questa ragione uno strumento per la misura della f.e.m può essere inserito in un qualsiasi punto di un circuito termoelettrico senza alterare la lettura, se i giunti così formati hanno eguale temperatura. E che inoltre è possibile prevedere il comportamento di una coppia qualsiasi di metalli se si conosce il potere termoelettrico di ciascun metallo rispetto ad un metallo di riferimento che di solito è il platino (Tabella VII.1).

### III legge delle temperature intermedie

*La f.e.m. termica di una coppia avente i giunti a temperatura  $T_1$  e  $T_2$  è la somma algebrica delle f.e.m. delle stesse coppie aventi i giunti ordinatamente alle temperature  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$ ,  $T_2$*

$$E_{T_1 T_2} = E_{T_1 T_3} + E_{T_3 T_2} \quad (\text{VII.5})$$

Conseguenza di questa legge è che il giunto di riferimento di un circuito può essere posto anche ad una temperatura nota e diversa dallo  $0^\circ\text{C}$  (temperatura per la quale sono ricavate le tabelle del potere termoelettrico). Situazione quest'ultima che si verifica spesso nei circuiti di misura "termocompensati" mediante un sensore di riferimento (generalmente una termoresistenza) interno al dispositivo elettrico di lettura (effettuando una misura della temperatura di riferimento all'interno del dispositivo).

Nella realtà nessun materiale è tecnologicamente ottenibile in fili sottili con una perfetta omogeneità, presentando inoltre alterazioni dovute a deformazioni e contaminazioni con conseguente nascita di f.e.m parassite che inficiano la precisione delle misure. Il contributo di queste f.e.m. all'incertezza di misura, essendo legato a fenomenologie non deterministiche, è quindi di tipo accidentale.

## 7.2 Curve caratteristiche delle termocoppie

Le caratteristiche dei metalli utilizzabili per la costituzione di termocoppie sono:

- la f.e.m. generata non deve variare con l'uso per fenomeni di ricristallizzazione o di stabilizzazione termica dei metalli. Per questa ragione tutti i metalli utilizzati sono sottoposti a trattamenti di stabilizzazione e ricottura;
- la resistenza all'ossidazione ed alla riduzione deve essere la più elevata possibile;
- il potere termoelettrico deve presentare lo stesso segno nel campo di temperatura di applicazione.

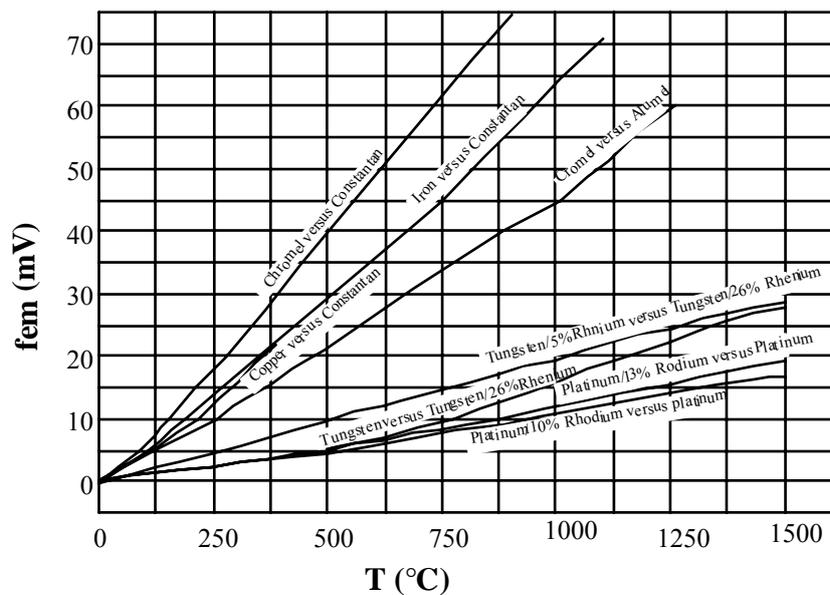


Fig VII.3 Curve caratteristiche delle termocoppie

Una volta verificate queste tre condizioni la curva caratteristica (f.e.m.-temperatura) di una termocoppia (Fig.VII.3) è di solito espressa, per sensori industriali, da polinomi di grado ennesimo del tipo:

$$E = At + Bt^2 + Ct^3 + Dt^4 + \dots \quad (\text{VII.6})$$

dove i coefficienti A,B,C,D sono caratteristici della coppia di metalli e del campo di temperatura. I coefficienti delle curve caratteristiche nominali sono definiti per le termocoppie normalizzate dalla UNI 7938. In tabella VII.2 vengono riportati, a titolo di esempio, i valori dei coefficienti dei polinomi per una termocoppia normalizzata rame-costantana (tipo T).

Nell'utilizzo di queste tabelle bisogna però tener conto che, essendo quest'ultime ricavate su dati medi di taratura di più termocoppie standard prodotte da diversi costruttori, esistono deviazioni non trascurabili dovute alla non perfetta riproducibilità del prodotto industriale. Il valore di tale deviazione è dell'ordine di grandezza di  $\pm 2^\circ\text{C}$  per le termocoppie normali e di  $\pm 1^\circ\text{C}$  per quelle in esecuzione speciale "premium Grade". Se per determinate applicazioni è necessaria una incertezza inferiore a quella garantita dall'uso delle tabelle è necessario procedere ad una taratura di ciascuna coppia utilizzata.

Tab.VII.2 Coefficienti dei polinomi per una termocoppia tipo T

Intervallo di temperatura	Grado	Coefficienti	Termine
-270÷0°C	14	3,8740773840E01	T
		4,4123932482E-2	T <sup>2</sup>
		1,1405238498E-4	T <sup>3</sup>
		1,9974406568E-5	T <sup>4</sup>
		9,0445401187E-7	T <sup>5</sup>
		2,2766018504E-8	T <sup>6</sup>
		3,6247409380E-10	T <sup>7</sup>
		3,8648924201E-12	T <sup>8</sup>
		2,8298678519E-14	T <sup>9</sup>
		1,4281383349E-16	T <sup>10</sup>
		4,8833254364E-19	T <sup>11</sup>
		1,0803474683E-21	T <sup>12</sup>
		1,3949291026E-24	T <sup>13</sup>
		7,9795893156E-28	T <sup>14</sup>
0÷400°C	8	3,8740773840E01	T
		3,3190198092E-2	T <sup>2</sup>
		2,0714183645E-4	T <sup>3</sup>
		-2,1945834823E-6	T <sup>4</sup>
		1,1031900550E-8	T <sup>5</sup>
		-3,0927581898E-11	T <sup>6</sup>
		4,5653337165E-14	T <sup>7</sup>
		-2,7616878040E-17	T <sup>8</sup>

Tra i tanti tipi di termocoppie resi possibili dall'abbinamento a due a due di metalli diversi, nella pratica commerciale sono disponibili differenti tipi di termocoppie normalizzate che coprono un esteso campo di misura. La scelta di una o dell'altra dipende, come vedremo dalle caratteristiche di ciascuna coppia e dalle caratteristiche dei singoli materiali costituenti quali: l'omogeneità, la stabilità, la resistenza all'ossidazione o alla riduzione, il valore del potere termoelettrico.

Nel seguito vengono discusse le principali caratteristiche delle termocoppie normalizzate, sinteticamente riportate nella tabella VII.3.

*Termocoppie tipo S - Platino/Platino rodiato (10% Rh)*

È la termocoppia utilizzata in passato per definire la IPTS'68 da 630,74°C a 1064,43°C. Essa, come tutte le termocoppie costituite da metalli nobili, presenta una elevata precisione specie nel campo al di sopra dei 500°C, inoltre al di sotto di tale temperatura fino a 0°C garantisce un'incertezza inferiore a  $\pm 1,5^\circ\text{C}$ .

Ne è comunque sconsigliato l'uso per valori non elevati della temperatura a causa del basso valore del potere termoelettrico. Questa termocoppia viene usata in atmosfera inerte od ossidante per la sua forte inerzia chimica e per la sua elevata stabilità alle alte temperature. Per contro teme molto le atmosfere riducenti e quelle con presenza di vapori metallici (vapori di ferro), che comportano un cambiamento delle caratteristiche del Platino. La scarsa resistenza alle temperature elevate in atmosfere riducenti è comunque una caratteristica comune a tutti i materiali per termocoppie; è possibile però ovviare a tale inconveniente usando opportune guaine di protezione realizzate di solito con un doppio strato di porcellana internamente e metallo esternamente. La presenza di dette guaine in sensori per applicazioni industriali provoca, per l'inerzia termica da esse introdotta, un peggioramento delle loro caratteristiche dinamiche. Ultimo svantaggio comune anch'esso a tutte le termocoppie costituite di metalli nobili è l'elevato costo dei fili costituenti la coppia.

Termocoppia tipo R - Platino/Platino rodiato (13% Rh)

Presenta le stesse caratteristiche della tipo S da cui è derivata dopo l'adozione della IPTS '68 per adeguare le risposte dei vecchi strumenti di lettura non adatti all'uso dei fili di platino molto puro immessi sul mercato negli anni '60. E' quindi una termocoppia destinata ad andare in disuso.

Termocoppie Tipo B - Platino Rodiato 30% / Platino Rodiato 6%

E' molto adatta a lavorare a temperature elevate dell'ordine dei 1700°C. Presenta le stesse caratteristiche dei tipi R ed S ed è inoltre adatta a lavorare anche sotto vuoto.

Termocoppia tipo T - Rame / Costantana

E' una termocoppia molto usata nel campo - 184÷370°C dove può essere adoperata anche in alternativa alle termocoppie a base Platino in quanto garantisce incertezze dello stesso ordine di grandezza  $\pm 1^\circ\text{C}$ . E' molto usata per il suo basso costo e per il suo elevato potere termoelettrico e per questo è l'unica termocoppia per la quale nelle norme vengono garantiti valori al di sotto di 0°C. La limitazione superiore del campo di applicazione è dovuta alla rapida ossidazione del rame alle elevate temperature.

Termocoppie tipo J - Ferro-Costantana

E' la termocoppia più diffusa nelle applicazioni industriali nel campo 0÷750°C, per la sua elevata capacità di adattarsi ad atmosfere sia riducenti che ossidanti, per il suo elevato potere termoelettrico ed ovviamente per il suo basso costo. E' meno precisa della termocoppia tipo T per il fatto che il ferro è di solito ottenuto con un grado di omogeneità minore del rame e questo fa nascere nell'interno del filo f.e.m. parassite dovute a gradienti di temperatura che come già detto inficiano la precisione di misura. Si noti che i fili di costantana per le due termocoppie T e J sono di solito diversi e quindi non sono intercambiabili tra loro.

Termocoppia tipo K - Chromel (90% Ni, 10% Cr) /Alumel (94%Ni, 3%Mn, 2%Al, 1%Si)

E' una termocoppia nata per sostituire le termocoppie a metallo nobile alle elevate temperature, infatti può essere utilizzata fino a 1260°C con una incertezza di  $\pm 2^\circ\text{C}$  in atmosfere inerti o ossidanti. Presenta però problemi di riproducibilità e di stabilità; recentemente ne è stata proposta infatti la sostituzione con la tipo N (non ancora normalizzata). Il campo tipico di applicazione è in tutte le applicazioni elettroniche. E' una termocoppia che, ultima nata, va rapidamente affermandosi per il suo elevato potere termoelettrico. Usata nel campo 0-870°C con precisione  $\pm 1.5^\circ\text{C}$  ha le stesse limitazioni della coppia tipo T.

E' utile infine sottolineare che oltre alle su citate termocoppie normalizzate è possibile trovare sul mercato anche tipi differenti come ad esempio la termocoppia tipo N (Nicrosil/Nisil) riconosciuta in ambito IEC, le termocoppie W3 (Tungsteno Renio 3% / Tungsteno Renio 25%) e W5 (Tungsteno Renio 5% / Tungsteno Renio 26%), la coppia Cobalto-Oro/Rame usata per temperature molto basse o la termocoppia Tungsteno/Molibdeno usata per le temperature elevatissime.

Di queste termocoppie non sempre esistono tabelle del potere termoelettrico in funzione della temperatura ed è quindi necessario tararle di volta in volta.

### **7.3 Affidabilità di una termocoppia**

Il problema dell'affidabilità di una termocoppia è un problema complesso, strettamente legato al tipo di uso che si fa della termocoppia, alle condizioni di misura più o meno gravose ed all'incertezza che si pretende dalla misura.

La prima causa di perdita di affidabilità delle termocoppie sta nella presenza di inomogeneità nei fili causata da fattori di natura chimica o fisica quali: volatilizzazione di un componente o contaminazione dovuta alla presenza di agenti corrosivi, stress meccanici quali piegamenti o stiramenti, mutazione della struttura cristallina del materiale a causa di diversi

trattamenti termici subiti da differenti porzioni di filo. Per questa ragione è buona norma l'uso di fili nuovi che sono esenti dalle suddette anomalie che possono verificarsi durante l'uso. A titolo di esempio in uno studio sulla stabilità della termocoppia Platino /Platino Rodio, si sono verificati i seguenti inconvenienti:

- rottura della termocoppia in seguito al riscaldamento per 10h a 1290°C°;
- deriva di 0,2°C in seguito al riscaldamento per 10h a 1200°C;
- deriva di 0,5°C in seguito al riscaldamento per 35 giorni a 800°C;
- deriva di 1°C in seguito al riscaldamento per 25 ore a 1600°C;
- deriva di 9°C mantenendo per 3 anni a 1290°C.

L'analisi di dati così discordanti dà una netta indicazione di come sia difficile stabilire a priori il grado di affidabilità di una termocoppia ed in particolare la durata di validità di una taratura, ne nasce solo una netta indicazione per l'uso di fili nuovi e/o tarature abbastanza frequenti se si vuole avere una misura precisa.

#### **7.4 Tecnologie costruttive delle termocoppie**

La termocoppia "nuda" su descritta difficilmente viene utilizzata senza un adeguato rivestimento di protezione. Inoltre la varietà dei problemi di misura ha portato nel tempo ad una molteplicità di soluzioni costruttive delle termocoppie.

Una termocoppia assiemata é infatti caratterizzata oltre che dal tipo di coppia termoelettrica, dalle dimensioni dei termoelementi, dal tipo di isolamento dei termoelementi (elettrico, chimico e meccanico) e infine dal tipo di giunto di misura (tipo di saldatura ed isolamento elettrico del giunto).

I termoelementi, cioè i singoli conduttori, si presentano solitamente in forma di fili di diametro standard (0,3-0,5-0,8-1,6-2,3-3,2 mm) avvolti su rocchetti o matasse a seconda del diametro. Per poter contenere le tolleranze in quelle indicate dalle norme, é necessario accoppiare i fili secondo la fornitura del produttore.

A parte le differenti dimensioni dei fili, che come già accennato influiscono sulla maggiore o minore resistenza e durata della termocoppia, una notevole importanza riveste il tipo di isolamento e di protezione della termocoppia. Da tali caratteristiche dipende infatti l'applicabilità della termocoppia in ambienti chimicamente non inerti, specie ad elevate temperature.

La termocoppia viene generalmente rivestita di una guaina flessibile o di un materiale ceramico resistente ad elevate temperature. Cio sia per garantire un adeguato isolamento elettrico dei fili tra loro e con l'ambiente circostante, sia per proteggere i termoelementi dall'attacco chimico. Al di sotto dei 1000°C la resistenza d'isolamento dovrebbe essere superiore a 1MΩ, mentre per temperature superiori possono essere tollerate resistenze dell'ordine di 1/10 di MΩ.

Tab. VII.4 Caratteristiche degli isolanti

Materiale	T [°C]	Resistenza a Abrasioni	Solventi	Acidi	Basi	Fiamma	Umidità
Clor di polivinile	-40÷104	buona	discreta	buona	buona	buona	buona
Nylon	-53÷149	ottima	buona	scarsa	buona	scarsa	buona
Kapton	-268÷316	ottima	buona	buona	buona	buona	ottima
Teflon (PFA)	-268÷260	ottima	ottima	ottima	ottima	ottima	ottima
Teflon (FEP)	-268÷204	ottima	ottima	ottima	ottima	ottima	ottima
Gomma silicone	-78÷200	discreta	discreta	scarsa	buona	scarsa	buona
Amianto	-78÷538	buona	ottima	ottima	ottima	ottima	scarsa
Fibra di Vetro	-78÷482	scarsa	ottima	ottima	ottima	ottima	discreta
Refrasil	-78÷871	scarsa	ottima	buona	buona	ottima	scarsa
Nextel	-18÷1427	discreta	ottima	buona	buona	ottima	discreta
MgO	<1650	scarsa	discreta	scarsa	buona	ottima	buona
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<1540	scarsa	buona	ottima	buona	ottima	buona
BeO	<2315	scarsa	buona	buona	ottima	ottima	buona

Per basse e medie temperature (inferiori ai  $300\div 400^{\circ}\text{C}$ ) vengono generalmente impiegate guaine isolanti flessibili a base di teflon, cloruro di polivinile, nylon, ecc.(Tab.VII.4), mentre per elevate temperature sono disponibili isolanti flessibili a base di fibre ceramiche, fibre di vetro, fibre di silice ed amianto, oppure isolanti a base di polveri di ossidi refrattari compattati (ossidi di alluminio, berillio, magnesio).Un pozzetto termometrico (Fig.VII.4) in acciaio inox, inconel, molibdeno, tantalio o lega di platino protegge ulteriormente la termocoppia e l'isolante da agenti meccanici (elevata pressione) e chimico-fisici.

Anche l'isolamento elettrico del giunto di misura riveste una notevole importanza. I principali tipi di giunzioni sono (Fig.VII.5):

- a) a giunto esposto;
- b) a giunto a massa;
- c) a giunto isolato.

Un giunto esposto risulta economico e comporta un tempo di risposta estremamente ridotto. Lo svantaggio principale consiste nel rapido deterioramento se esposto ad agenti corrosivi e nella necessità di un ingresso di fem differenziale.

Un giunto a massa é realizzato saldando direttamente il giunto caldo della termocoppia sul pozzetto termometrico, pertanto pur essendo, come il giunto esposto, soggetto a loop contro terra, presenta il vantaggio di essere parzialmente protetto da agenti esterni.

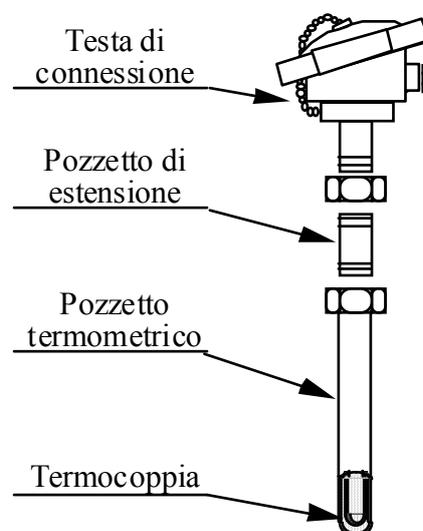


Fig.VII.4 Termocoppia assiemata

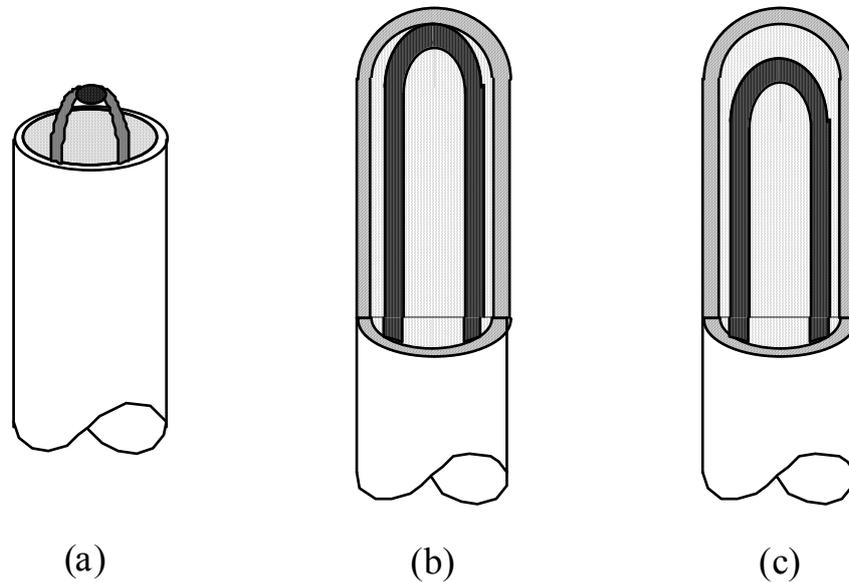


Fig.VII.5 Tipi di giunto caldo: a) esposto, b) a massa, c) isolato.

Un giunto isolato, infine, è costruito in modo tale da essere completamente isolato dal pozzetto termometrico. Ciò limita fortemente l'insorgere di loop contro terra e l'influenza di fem parassite, inoltre aumenta la reiezione al rumore del sensore. Per contro aumenta il costo della termocoppia ed il suo tempo di risposta.

### 7.5 Circuiti termoelettrici e misura della forza elettromotrice

Un circuito termoelettrico elementare è costituito da due giunti e da un misuratore di f.e.m. (Fig.VII.6). Quest'ultima dipende, come detto, dalla differenza di temperatura fra i due giunti, quindi se si vogliono effettuare misure di temperatura assoluta è necessario mantenere uno dei due giunti ad una temperatura costante e nota di riferimento. Questa di norma è scelta pari a  $0^{\circ}\text{C}$ , e viene ottenuta con pozzetti contenenti acqua e ghiaccio. Nelle applicazioni di tipo industriale non è agevole l'uso di tali pozzetti per cui si usa mantenere il giunto di riferimento a temperatura ambiente o si utilizzano apparecchiature di lettura autocompensate,

cioè contenenti un giunto di riferimento a temperatura nota Fig. VII.7 (cfr. Fig. VII.6). Per misure di elevata precisione si utilizzano apparecchiature frigorifere in grado di mantenere 0°C con una discreta stabilità, in appositi contenitori sigillati contenenti acqua pura e nei quali è immerso il giunto di riferimento.

Molte volte in campo industriale non è conveniente dal punto di vista economico estendere i fili della termocoppia sino al punto di misura a temperatura  $T_1$ , per cui si realizza un giunto di riferimento intermedio ad una generica temperatura  $T$ , collegando lo strumento di lettura alla termocoppia per mezzo dei cosiddetti fili di compensazione. Questi altro non sono che due fili aventi le stesse caratteristiche termoelettriche dei fili della termocoppia, ma di qualità e quindi costo inferiore. In particolare questi fili sono particolarmente usati per collegare le termocoppie di metallo nobile, di costo elevato, a punti di misura molto distanti da quelli lettura. Nel caso di specie della termocoppia Pt /PtRh(10%) sono uno di rame e l'altro di lega di rame con caratteristiche termoelettriche uguali a quelli della suddetta coppia.

Per quanto riguarda infine le misure di f.e.m., nella pratica industriale si è soliti leggere i valori della f.e.m. con un galvanometro graduato. Tale pratica è però poco precisa, infatti la f.e.m. così misurata  $E_G$  non è coincidente con la f.e.m. incognita  $E_T$  generata dalla termocoppia ma è  $E_T = E_G + (R_{TC} + R_C) i$

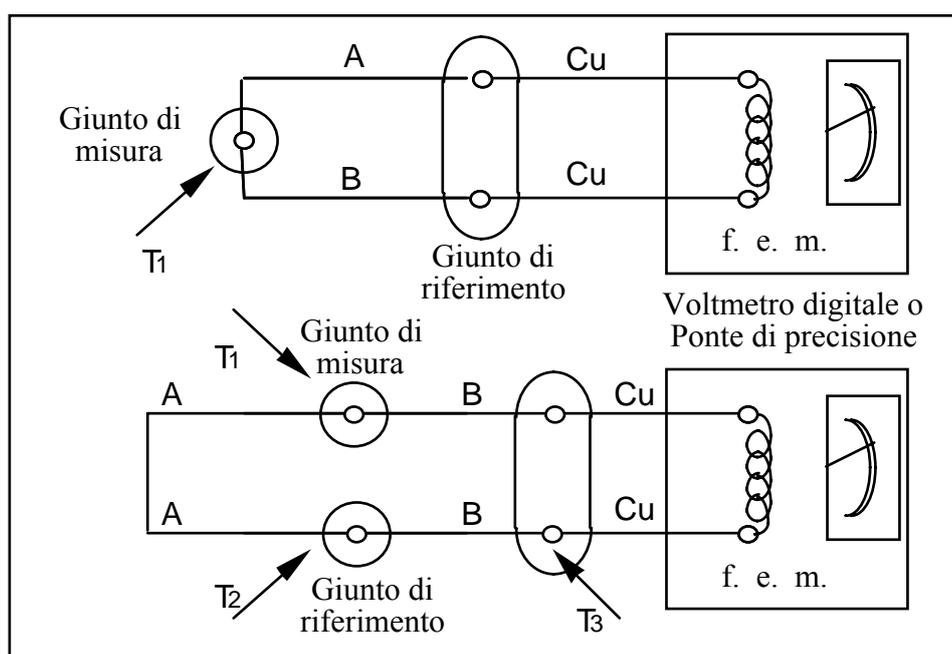


Fig VII.6 Collegamenti elettrici delle termocoppie

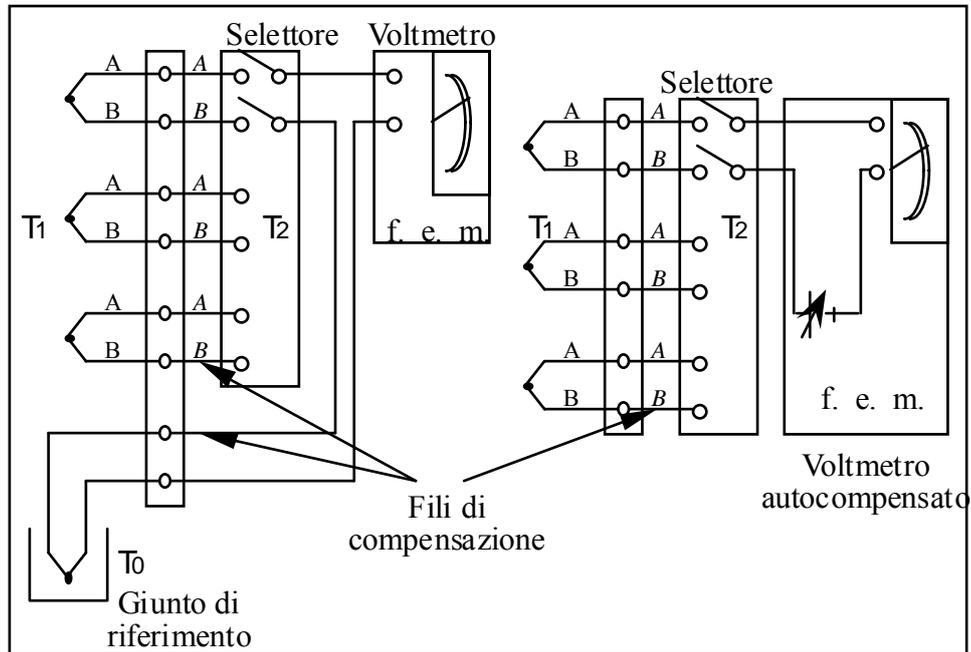


Fig VII.7 Collegamenti elettrici multipli delle termocoppie

dove con  $i$  si è indicata la corrente che circola nel circuito di misura,  $R_{TC}$  e  $R_C$  le resistenze della termocoppia e dei cavi di collegamento.

D'altro canto se è  $R_G$  la resistenza del galvanometro di ha;  $E_G = R_G i$  e quindi:

$$E_T = \left[ 1 + \frac{R_{TC} + R_C}{R_G} \right] E_G \quad (\text{VII.8})$$

differenziando la (VII.8) si ottiene:

$$\Delta E_T = E_G \frac{\Delta(R_{TC} + R_C)}{R_G} - E_G \frac{R_{TC} + R_C}{R_G} \frac{\Delta R_G}{R_G} + \left( 1 + \frac{R_{TC} + R_C}{R_G} \right) \Delta E_G \quad (\text{VII.9})$$

che, se come di norma di verifica, è  $R_{TC} + R_C \ll R_G$  diventa:

$$\frac{\Delta E_T}{E_T} = \frac{\Delta(R_{TC} + R_C)}{R_{TC} + R_C + R_G} + \frac{\Delta E_G}{E_G} \quad (\text{VII.10})$$

Il secondo termine della (VII.10) dipende dalla classe del galvanometro usato, il primo dall'accoppiamento circuito termoelettrico (cavi di compensazione, galvanometro). E' facile ricavare che se la resistenza interna del galvanometro non è molto elevata la variazione di resistenza dei fili della termocoppia esposti a notevoli gradienti termici può portare ad errori anche dello 0,5% sul valore misurato di  $E_T$  che, se si usano le tabelle, è noto con una precisione non molto elevata per cui il metodo di misura risulta abbastanza impreciso.

Se il voltmetro di lettura è però un voltmetro elettronico o digitale con impedenze interne dell'ordine dei megaohm la (VII.10) diventa  $\Delta E_T/E_T = \Delta E_G/E_G = \Delta V/V$  e quindi la precisione nel determinare la f.e.m. dipende solo dalla classe dello strumento scelto.

Per misure molto precise della f.e.m. generata da una termocoppia si utilizza di norma un circuito del tipo potenziometrico la cui versione più semplice è riportata in Fig. VII.8. La misura di f.e.m. viene in tale caso effettuata paragonando la f.e.m. generata dalla termocoppia con quella di una pila campione  $E_C$  del tipo a cella di Weston (1.0186V) o al Cadmio (1.019V).

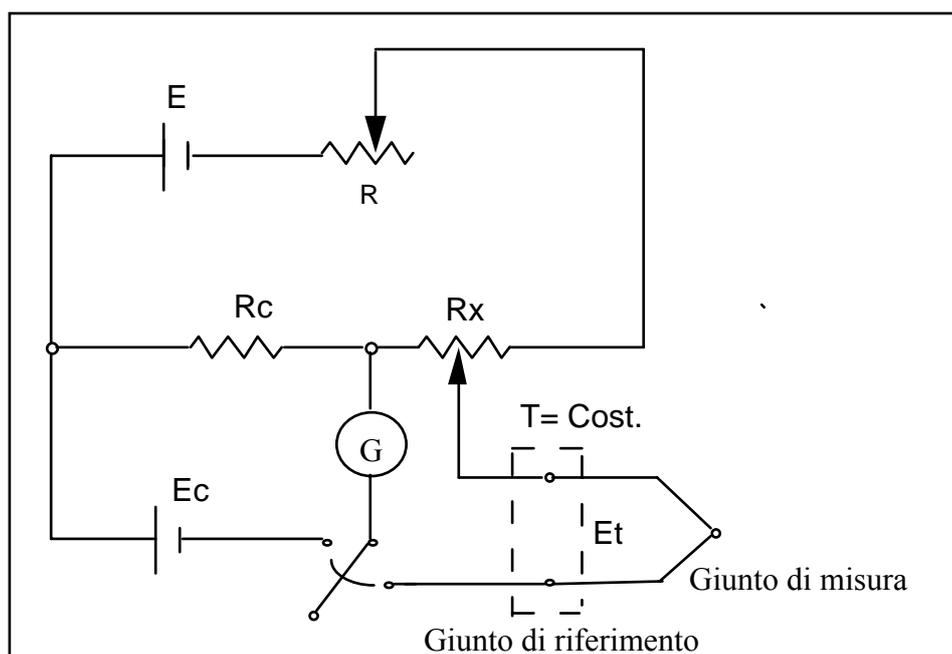


Fig VII.8 Circuito di misura potenziometrico

Infatti, bilanciando il circuito di figura ed inserendo tramite il commutatore una volta la pila ed una volta la termocoppia si ha:

$$E_T = \frac{R_X}{R_C} E_C \quad (\text{VII.11})$$

Poiché durante la misura non circola corrente attraverso la termocoppia la resistenza dei fili e dei cavi di compensazione non interviene nella misura. La precisione di questi strumenti è come detto molto elevata 0,015%, bisogna in ogni caso sottolineare che aumentare la precisione di lettura della f.e.m.  $E_T$  è inutile se non si conosce con precisione il legame tra  $E_T$  e la temperatura della termocoppia in uso e cioè non si è tarata a priori la termocoppia.