

4. GLI EFFETTI DELLA TEMPERATURA SULLA LUNGHEZZA

4.1 INTRODUZIONE

La temperatura di riferimento per le specifiche geometriche dei prodotti è fissata a 20 °C dalla norma ISO 1:2002. La norma specifica che non è necessario che tutte le tarature, le misure per le verifiche di accettazione dei pezzi e le lavorazioni meccaniche in produzione siano effettuate alla temperatura di riferimento; ricorda però che nelle misure dimensionali, una temperatura di misura diversa dalla temperatura di riferimento può:

- condurre alla necessità di correggere il risultato della misurazione;
- contribuire ad aumentare l'incertezza di misura.

Anche se si lavora ad una temperatura di 20 °C si ha una comunque un'incertezza dovuta all'incertezza con cui è nota la temperatura.

L'applicazione della ISO 1 fa sì che tutte le quote che noi leggiamo, ad esempio su di un disegno meccanico, siano riferite alla temperatura di 20 °C anche se non è espressamente dichiarato sul disegno stesso. Analogamente quando andiamo a misurare una caratteristica dell'oggetto, rappresentato sul disegno, dobbiamo fare in modo che il risultato della misurazione, indipendentemente dal valore della temperatura dell'oggetto e dell'ambiente di misura, sia riferito ai 20 °C affinché sia confrontabile con l'indicazione riportata sul disegno.

Le misure dimensionali sono influenzate dalla temperatura in quanto tutti i materiali (in misura maggiore o minore) si dilatano e si contraggono in relazione alla variazione della loro temperatura. Se la temperatura alla quale vengono effettuate le misure dimensionali (t_M) coincide con la temperatura di riferimento, la variazione dimensionale rispetto ai 20 °C e quindi l'eventuale correzione (da apportare al risultato) dovuta all'effetto termico è nulla, ma l'incertezza con cui abbiamo valutato la temperatura di misura (incertezza dell'ipotesi $t_M = 20$ °C) rappresenta comunque un contributo di incertezza al risultato della misura. Se viceversa la misura dimensionale viene effettuata ad una temperatura diversa dalla temperatura di riferimento, avremo una dilatazione termica a carico del misurando e dello strumento di misura e quindi avremo un effetto dovuto alla variazione termica differenziale tra il misurando e lo strumento di misura. Questo effetto causa un errore sistematico che, se non corretto, influenza il risultato della misura. La decisione se correggere o non correggere il risultato della misura dagli effetti termici (quando $t_M \neq 20$ °C) dipende, come vedremo, da valutazioni gestionali in termini di costi e rischi. Ma, indipendentemente dall'applicare o meno la correzione, è opportuno ricordare che gli effetti termici forniscono sempre dei contributi d'incertezza che è necessario considerare nel bilancio dell'incertezza di misura di una caratteristica geometrica del prodotto.

Infatti, anche nel caso di correzione dell'errore sistematico dovuto agli effetti termici, avremo sempre un'incertezza su tale correzione dovuta alla non perfetta conoscenza delle temperature e del comportamento termico dei materiali; tale incertezza deve essere considerata nella valutazione dell'incertezza di misura. Nel seguito cercheremo di calcolare in modo semplice le correzioni da apportare al valore di misura ed i contributi d'incertezza che si hanno, sia nel caso in cui si decida di correggere, sia di non correggere.

Al fine di migliorare la comprensione della trattazione degli effetti termici, si introducono le seguenti definizioni:

- t_m : temperatura media del misurando;
- θ_m : $t_m - 20\text{ }^\circ\text{C}$ differenza tra la temperatura media del misurando ed i $20\text{ }^\circ\text{C}$;
- t_s : temperatura media della scala dello strumento;
- θ_s : $t_s - 20\text{ }^\circ\text{C}$ differenza tra la temperatura media della scala dello strumento ed i $20\text{ }^\circ\text{C}$;
- t_M : temperatura media dell'ambiente di misura;
- θ_M : $t_M - 20\text{ }^\circ\text{C}$ differenza tra la temperatura media dell'ambiente di misura ed i $20\text{ }^\circ\text{C}$;
- $u(t_m) = u(\theta_m)$: incertezza tipo della temperatura media del misurando;
- $u(t_s) = u(\theta_s)$: incertezza tipo della temperatura media della scala dello strumento;
- $u(t_M) = u(\theta_M)$: incertezza tipo della temperatura media dell'ambiente di misura;
- α_m : coefficiente di dilatazione termica (CDT) del misurando;
- α_s : coefficiente di dilatazione termica (CDT) della scala dello strumento;
- $u(\alpha_m)$: incertezza tipo del coefficiente di dilatazione termica del misurando;
- $u(\alpha_s)$: incertezza tipo del coefficiente di dilatazione termica della scala dello strumento.

NOTA SULLA MISURA DELLA TEMPERATURA

La definizione della temperatura termodinamica, basata sul teorema di Carnot o sulla legge dei gas perfetti, consente al metrologo di definire l'unità di temperatura indipendentemente da qualsiasi sostanza termodinamica (anche dal gas perfetto) a patto però che si stabilisca un valore di riferimento della temperatura.

Nel 1954, la Xª CGPM decise di scegliere, come stato termico di riferimento, il punto triplo dell'acqua, a cui si attribuì il valore di temperatura pari a $273,16\text{ K}$ (K è il simbolo dell'unità SI kelvin). La XIIª CGPM nel 1967 stabilì quindi la seguente definizione: "il kelvin, unità di temperatura termodinamica, è la frazione $1/273,16$ della temperatura termodinamica del punto triplo dell'acqua". Il punto triplo dell'acqua, caratterizzato dalla coesistenza in equilibrio delle tre fasi solida, liquida e vapore, si ottiene in celle di vetro sigillate contenenti acqua di grande purezza; la riproducibilità del punto triplo dell'acqua è migliore di $0,1\text{ mK}$.

Per il SI la temperatura termodinamica, oltre che in kelvin, può essere espressa anche ricorrendo all'unità grado Celsius (simbolo $^\circ\text{C}$). La relazione tra la temperatura espressa in gradi Celsius (simbolo t) e la temperatura espressa in kelvin (simbolo T) è:

$$t/^\circ\text{C} = T/\text{K} - 273,15$$

L'unità grado Celsius è uguale all'unità kelvin e quindi $1\text{ }^\circ\text{C} = 1\text{ K}$. Alcuni, erroneamente, scambiano il grado Celsius con il grado centigrado; quest'ultimo è una unità che appartiene alla storia, non più alla scienza ed alla pratica delle misure.

4.2 L'EFFETTO DELLA TEMPERATURA SULLA LUNGHEZZA

Il parametro che caratterizza l'influenza della temperatura sulla dimensione di un oggetto è chiamato **coefficiente di dilatazione termica** (CDT con simbolo α); esso, in prima approssimazione, rappresenta il rapporto tra la variazione relativa di lunghezza e la variazione di temperatura che l'ha provocata ed è dato dalla seguente formula:

$$\alpha(20, t_m) = \frac{L_t - L_{20}}{L_{20}(t_m - 20)}$$

ove :

L_t : lunghezza dell'oggetto alla temperatura t_m ;

L_{20} : lunghezza dell'oggetto alla temperatura di 20 °C;

Il coefficiente α può essere determinato tramite prove sperimentali ed è inoltre noto, con una opportuna incertezza, per la maggior parte dei materiali (vedi Appendice 4). Tramite il coefficiente α possiamo quindi esprimere la lunghezza di un oggetto (che chiameremo nel seguito misurando caratterizzandolo con il pendice m : $L_{mt} \equiv L_t$; $L_{m20} \equiv L_{20}$) in relazione alla sua temperatura con il seguente modello:

$$L_{mt} = L_{m20} + \Delta_E = L_{m20} + L_{m20} \cdot \alpha_m \cdot (t_m - 20) \quad [4.1]$$

avendo indicato con Δ_E la variazione termica del misurando rispetto ai 20 °C (corrisponde al vecchio parametro NE , acronimo dell'inglese Nominal Expansion) data da:

$$\Delta_E = L_{m20} \cdot \alpha_m \cdot (t_m - 20)$$

Risulta evidente che se la temperatura t_m dell'oggetto è maggiore dei 20 °C, Δ_E ha un valore positivo e quindi l'oggetto si dilata (figura 4.1) mentre se la temperatura t_m dell'oggetto è minore dei 20 °C, Δ_E ha un valore negativo e quindi l'oggetto si contrae. Il termine Δ_E rappresenta quindi l'**errore**

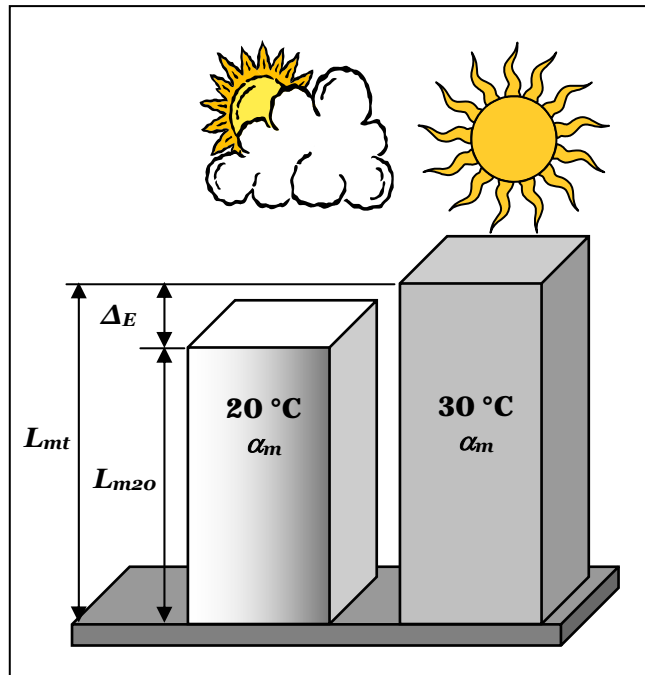


Figura 4.1: la dilatazione termica

termico nella misura della lunghezza del misurando trascurando, per ora, ogni effetto termico a carico dello strumento. Se si utilizza il termine Δ_E per correggere il valore letto sullo strumento (correzione termica) occorre ricordarsi che va cambiato di segno.

Dimensionalmente il coefficiente di dilatazione termica viene spesso espresso in 10^{-6} K^{-1} ovvero in parti per milione (ppm) per una variazione unitaria della temperatura. Ciò significa che se abbiamo un oggetto in ferro avente lunghezza pari a 1 m e conosciamo il suo coefficiente di dilatazione termica pari a $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, esso si dilata di 11,5 parti per milione e quindi $11,5 \text{ }\mu\text{m}$ per ogni grado di temperatura in più rispetto ai $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

L'effetto della temperatura però non si ha solo sull'oggetto che si sta misurando, ma si manifesta anche sulla scala dello strumento utilizzato per la misura. Infatti anche per la scala di lettura dello strumento possiamo scrivere la seguente relazione:

$$L_{st} = L_{s20} + L_{s20} \cdot \alpha_s \cdot (t_s - 20) \quad [4.2]$$

ove :

L_{st} : lunghezza della scala di lettura alla temperatura t_s ;

L_{s20} : lunghezza della scala di lettura alla temperatura di $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Occorre ricordare che la scala di lettura dello strumento è stata tarata alla temperatura di riferimento ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) e quindi fornisce un valore corretto, nei limiti di incertezza calcolati, solo se posta alla temperatura di $20 \text{ }^\circ\text{C}$; se la scala è posta ad una temperatura diversa dai $20 \text{ }^\circ\text{C}$, è necessario considerare la sua variazione di lunghezza come indicato dall'equazione [4.2].

Nel valutare quindi il risultato di una misurazione in relazione agli effetti termici ed apportare le giuste correzioni, è necessario considerare sia la variazione di lunghezza del misurando sia la variazione di lunghezza della scala dello strumento.

Per modellizzare gli effetti termici dovremo uguagliare (figura 4.2) la lunghezza dell'oggetto alla temperatura del misurando t_m con la lettura della scala dello strumento alla temperatura della scala t_s e quindi:

$$L_{mt} = L_{st} \quad [4.3]$$

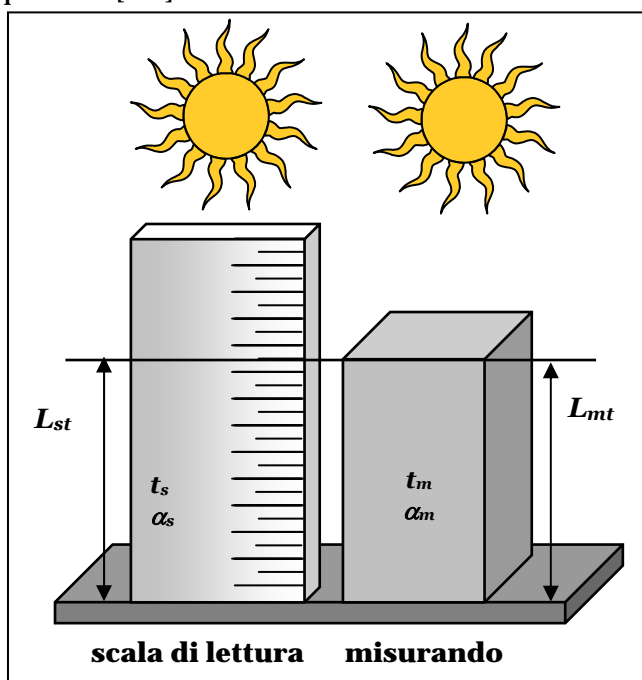


Figura 4.2: strumento e misurando

Facendo le opportune sostituzioni (equazione [4.1] e [4.2] nella equazione [4.3]) e ponendo $L_{s20} = L_{m20} = L$ (lunghezza nominale a 20 °C) quando moltiplicati per α , possiamo scrivere:

$$L_{m20} = L_{s20} + L \cdot [\alpha_s \cdot (t_s - 20) - \alpha_m \cdot (t_m - 20)] = L_{s20} + \Delta_{DE} \quad [4.4]$$

avendo indicato con Δ_{DE} la variazione termica differenziale tra strumento e misurando data da:

$$\Delta_{DE} = L \cdot [\alpha_s \cdot \theta_s - \alpha_m \cdot \theta_m] \quad [4.5]$$

Il termine Δ_{DE} rappresenta quindi l'**errore termico** nella misura del misurando.

Si ricorda che la relazione [4.4] serve sia per calcolare la correzione da apportare al misurando sia per stimarne l'incertezza come descritto nel riquadro sotto riportato.

VALUTAZIONE DEL CONTRIBUTO TERMICO ALL'INCERTEZZA DI MISURA

Per i lettori più esperti calcoliamo il contributo all'incertezza di misura dato dal termine Δ_{DE} (contributo termico u_{ct}) posto che si effettua una correzione pari a $-\Delta_{DE}$, ovvero che, dalla equazione [4.4], si considera come risultato di misura $L_{m20} = L_{s20} + (-\Delta_{DE})$, facendo le seguenti ipotesi:

- le misure di temperatura effettuate sul misurando e sulla scala dello strumento sono fra loro non correlate;
- i coefficienti di dilatazione termica del misurando e della scala dello strumento sono fra loro non correlati;
- le temperature del misurando e della scala dello strumento sono uniformi (stessa temperatura in tutti i punti) e sono costanti nel tempo.

Come detto nel capitolo 3, consideriamo le seguenti grandezze d'ingresso: α_s , θ_s , α_m e θ_m relative al termine Δ_{DE} . Per ciascuna di esse calcoliamo i coefficienti di sensibilità ovvero le derivate parziali di L_{m20} rispetto alle grandezze d'ingresso; avremo:

$$\begin{aligned} (\partial L_{m20} / \partial \alpha_s) &= L \cdot \theta_s ; \\ (\partial L_{m20} / \partial \theta_s) &= L \cdot \alpha_s ; \\ (\partial L_{m20} / \partial \alpha_m) &= -L \cdot \theta_m ; \\ (\partial L_{m20} / \partial \theta_m) &= -L \cdot \alpha_m . \end{aligned}$$

Chiamando $u(\alpha_s)$, $u(t_s)$, $u(\alpha_m)$ e $u(t_m)$ le incertezze tipo delle grandezze d'ingresso, per il contributo termico u_{ct} si può scrivere:

$$u_{ct}^2(L_{m20}) = L^2 \cdot \theta_s^2 \cdot u^2(\alpha_s) + L^2 \cdot \alpha_s^2 \cdot u^2(t_s) + L^2 \cdot \theta_m^2 \cdot u^2(\alpha_m) + L^2 \cdot \alpha_m^2 \cdot u^2(t_m) \quad [4.6]$$