

L'influenza della temperatura nelle misure dimensionali

Furio Cascetta, Marilena Musto, Gerardo Turchetti

I controlli di qualità della lavorazione e del prodotto, nell'industria, non possono prescindere dalla verifica delle tolleranze e da precisi riscontri quantitativi. La metrologia dimensionale fornisce rigorosi criteri di interpretazione della misura e gli strumenti necessari a ricavare una corretta stima dell'errore. La temperatura ha un ruolo di rilievo tra le grandezze che possono alterare il risultato di una misurazione, per questo motivo la conoscenza delle relazioni che intercorrono tra questa e il valore delle grandezze fisiche rilevate riveste un interesse industriale oltre che scientifico.

La realizzazione di un oggetto ottenuto attraverso l'impiego di tecniche di lavorazione industriali non può prescindere da una serie di fasi, opportunamente sequenziate tra loro, volte ad ottenere un prodotto in tempi ragionevoli, con costi contenuti e che sia rispondente alle specifiche di progetto.

Se si fa riferimento al campo dell'industria della meccanica di precisione, si può pensare di schematizzare la sequenza sovraccitata in questo modo: progettazione, ingegnerizzazione di prodotto, produzione, controllo qualità di prodotto. Nella prima fase viene generato il disegno (o più di uno) dell'oggetto da realizzare comprendente le opportune tolleranze geometriche e dimensionali. La seconda fase consiste, invece, nella traduzione del disegno nelle istruzioni di lavoro che dovranno essere applicate dagli operatori per l'ottenimento dell'oggetto; la terza, in questa sede, può essere considerata l'attuazione della seconda. Il controllo qualità di prodotto opera le opportune attività di verifica non solo sulle caratteristiche qualitative del manufatto, ma anche sulle sue caratteristiche dimensionali e quindi sulla conformità di queste con le fasce di tolleranza stabilite in sede progettuale.

Quest'ultimo controllo si estrinseca di fatto attraverso una serie di misurazioni dimensionali, effettuate con strumenti (dal semplice calibro a corsoio alle macchine di misura a coordinate) che dipendono dall'elemento in questione e dalla "qualità" con la quale si desidera ottenere la misura. La metrologia dimensionale, in sintesi, si occupa delle misure di lunghezza e di angolo e permette di descrivere gli oggetti mediante un modello geometrico. In generale, l'obiettivo di una misurazione è quello di determinare il valore del misurando, ossia il valore della grandezza da misurare, ed di associarne la relativa incertezza. Pertanto, una misurazione non può prescindere da un'adeguata definizione del misurando, del metodo e del procedimento di misura.

In sintesi, i risultati delle misurazioni sono solamente delle stime dei valori del misurando e risultano completi unicamente se accompagnati da una dichiarazione circa l'incertezza di tale misurazione (definita dalla Gum come: "parametro associato al risultato di una misurazione, che caratterizza la dispersione dei valori ragionevolmente attribuibili al misurando", [1,2]). Per le misure di lunghezza, le fonti di errore e le incertezze sono diverse ed articolate, ad esempio: definizione del misurando, procedura di misura ed allestimento sperimentale, strumentazione di misura, campioni di riferimento, ambiente di misura, operatore, software, algoritmi di calcolo, ecc. Risulta essenziale definire accuratamente la relazione funzionale $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$, che lega le grandezze in ingresso allo strumento di misura (X_1, X_2, X_N) a quella di uscita Y , per valutare l'intervallo di incertezza da associare al valore stimato del misurando.

Una delle grandezze di influenza ("grandezza che non è il misurando ma che altera il risultato della misurazione" [1,2]) da includere certamente tra quelle di ingresso è la temperatura, in virtù del peso rilevante che questa comporta nel computo dell'incertezza tipo composta. La valutazione di questi effetti termici è ricondotta inevitabilmente alla misura della temperatura dell'ambiente nel quale vengono effettuate le misure dimensionali.

Dal punto di vista normativo l'approccio al problema ha subito negli anni un forte cambiamento. Infatti, la norma Uni 8928-1987 prevede che l'ambiente di misura deve essere condizionato termicamente a $20 \pm 0,5$ °C. Le oscillazioni intorno al punto di regolazione devono avere una costante di tempo maggiore di 1 ora. Il gradiente termico nel volume occupato dal comparatore e dai blocchetti deve essere inferiore a 0,1 °C/m, l'umidità relativa deve essere mantenuta al di sotto del 50%. Gli effetti della temperatura sulle misure dimensionali vengono valutati secondo un diverso approccio dalla più recente Iso/Tr 16015:2003 [3] che non fissa un valore limite al quale conformare la temperatura ambiente, bensì sottolinea la necessità di tener conto dell'eventuale scosta-

F. Cascetta, Diam, Seconda Università di Napoli; M. Musto, Detec, Università di Napoli "Federico II"; G. Turchetti, Cer, Centro Ricerche del Cis-Interporto, Nola

mento dal valore di riferimento (per convenzione internazionale, la temperatura di riferimento per le misurazioni dimensionali è fissata a 20 °C) in modo da operare le opportune correzioni di tali errori sistematici. Nel caso in cui non si prevede di effettuare la correzione connessa agli effetti termici della temperatura, la norma suggerisce almeno il calcolo di un indice da confrontare con le tolleranze dimensionali dell'elemento sottoposto a misurazione. In questo lavoro viene fornita un'analisi metrologica degli errori sistematici e dei contributi all'incertezza di misura dovuti agli effetti della temperatura nelle misure dimensionali.

Gli effetti termici nelle misure dimensionali

In base al principio fisico della dilatazione termica dei materiali, i corpi di uno stesso materiale ma con masse sensibilmente diverse, si deformano in modo differente in conseguenza dei propri tempi di stabilizzazione. Nel caso in cui la misura dimensionale viene realizzata alla temperatura di riferimento (20 °C), la dilatazione termica nominale è nulla, ma bisognerà considerare il contributo all'incertezza della misura di temperatura [4]. Nella maggior parte dei casi le misurazioni di lunghezza, in particolar modo quelle *per confronto*, sono inevitabilmente effettuate a temperature diverse da quella di riferimento; in tal caso si ha una dilatazione termica differenziale intesa come differenza tra la variazione di lunghezza del pezzo e quella del campione, in conseguenza allo scostamento reciproco tra la loro temperatura al momento della misurazione e la temperatura di riferimento.

Nel caso in cui la temperatura del pezzo e quella del campione risultino uguali tra di loro, ma diverse da 20 °C, la dilatazione termica differenziale sarà nulla solo se i coefficienti di dilatazione lineare del pezzo e del campione risulteranno identici. Le fluttuazioni della temperatura all'interno dell'ambiente di misura inducono variazioni dimensionali sui componenti della macchina di misura (comparatori monoassiali di blocchetti pianoparalleli, cmm ecc.), sull'elemento da misurare e sull'eventuale campione di riferimento.

Le variazioni dimensionali dei componenti della macchina dipendono dal tipo e dai materiali che la compongono, inoltre esse comportano non solo un'alterazione del risultato della misura, ma anche una sensibile variazione nel comportamento dinamico della macchina. D'altra parte la temperatura ha un'influenza diversa sul risultato della misurazione in funzione del metodo di misura impiegato:

- *misure dirette*, quando si utilizza la macchina di misura come campione dimensionale per determinare direttamente le caratteristiche geometriche dell'elemento da misurare; in questo caso le componenti di incertezza derivano dalle deformazioni geometriche di tutti i componenti della macchina di misura e dalla sua capacità di riprodurre il campione di lunghezza.
- *misure per confronto*, quando si utilizza la macchina di misura come comparatore per valutare la differenza tra le dimensioni dell'elemento in misura (X_m) e le dimensioni del campione (X_{st}). Trattandosi di misurazioni per differenza su lunghezze teoricamente uguali, i contributi degli errori

associati alla deformazione dei componenti di natura termica si tendono ad eliminare.

Indipendentemente dalle modalità con le quali viene condotta la misurazione, una volta ottenuto il valore non corretto L_m bisogna valutare le principali componenti termiche nel calcolo dell'incertezza globale:

- valutare le temperature degli elementi oggetto della misurazione u_{TM} (in taratura sia il campione che l'elemento da verificare);
- valutare l'influenza della temperatura sui coefficienti di dilatazione termica u_{DE} ;
- valutare l'incertezza dovuta all'eventuale variazione della temperatura ambiente da quella di riferimento u_{ETVE} .

Queste componenti portano alla valutazione dell'incertezza dovuta ad effetti termici utilizzata per correggere il valore L_m . Nel caso in cui non si vuole effettuare la suddetta correzione, viene calcolato il TE_i (Thermal Index Error) e confrontato con l'incertezza massima ammissibile.

$$TEI = \frac{TE}{TOL} \cdot 100 = \frac{TE}{U_{max}} \cdot 100$$

La componente dell'incertezza dovuta agli effetti termici si esprime come:

$$u_{CT}(L) = \sqrt{u_{TS}^2(L) + u_{TW}^2(L) + u_{ETVE}^2(L)}$$

In generale, qualunque sia l'oggetto materiale considerato, non è semplice valutare il suo coefficiente di dilatazione lineare: svariate, infatti, sono le variabili che concorrono a generare incertezza nella sua stima (differenze nella composizione chimica o fisica dell'oggetto reale rispetto al campione utilizzato per la misurazione del coefficiente, scostamenti tra i valori reali ed i valori pubblicati, differenze tra i valori ottenuti da pubblicazioni differenti ecc.). Riferendosi ad un sistema comparatore di blocchetti pianoparalleli un'espressione valida dell'incertezza u_{DE} è la seguente:

$$u_{DE} = \sqrt{L_S^2 \theta_S^2 u^2(\alpha_S) + L_W^2 \theta_W^2 u^2(\alpha_W)}$$

dove L_S , θ_S , L_W , θ_W sono rispettivamente lunghezza e temperatura media del blocchetto campione e del blocchetto in taratura; i termini $u(\alpha_S)$ e $u(\alpha_W)$ rappresentano le incertezze relative alla determinazione dei coefficienti di dilatazione termica lineare del campione di riferimento e del misurando, rispettivamente. Si sottolinea che il peso dell'incertezza nella determinazione del coefficiente di dilatazione lineare, nella composizione dell'incertezza composta $u_{CT}(L)$ dovuta agli effetti termici, è funzione dello scostamento tra la temperatura media e la temperatura di riferimento. L'espressione dell'incertezza relativa al rilievo della temperatura alla quale si effettua la misurazione dimensionale, sempre con riferimento alla taratura del blocchetto piano-parallelo, è la seguente:

$$u_{DE} = \sqrt{\alpha_S^2 L_S^2 u^2(\theta_W) + \alpha_W^2 L_W^2 u^2(\theta_S)}$$

I termini $u(\theta_S)$ e $u(\theta_W)$ rappresentano le incertezze della misura della temperatura del campione di riferimento e del misurando, rispettivamente. Si assume che le misure della temperatura del campione e del misurando non siano correlate tra loro: ciò è possibile solo se le due misure sono ottenute mediante due diversi termometri. Infine, il contributo all'incertezza dovuto all'eventuale scostamento della temperatura ambiente da quella di riferimento, u_{ETVE} viene valutato, a partire da E_{TVE} (variazione dimensionale dovuta allo scostamento della temperatura ambiente) attraverso un test di deriva utilizzando una delle seguenti procedure:

- misurare l' E_{TVE} relativo al sistema di misura, per ottenere una sua distribuzione nel tempo. Il modello della distribuzione può allora essere scelto in accordo con la sua forma attuale e l'incertezza tipo calcolata secondo le procedure statistiche;
- assumere che i possibili valori per l'errore dovuto alla scostamento della temperatura ambiente (E_{TVE}) da quella di riferimento, siano uniformemente distribuiti all'interno dell'intervallo di valori ottenuti per E_{TVE} durante un test singolo di misura. L'incertezza tipo ottenuta si può esprimere mediante la seguente distribuzione uniforme:

$$u_{ETVE}(L) = \frac{E_{TVE}}{2\sqrt{3}}$$

Nel calcolo di tale incertezza il massimo errore è legato all'intervallo di variazione della temperatura intorno a quella di riferimento osservata durante il test di deriva (dal valore più basso a quello più alto e viceversa). La funzione di densità di probabilità che si può utilizzare nel caso, ad esempio, in cui l'andamento della temperatura è sinusoidale (poco probabile), è la distribuzione ad U (U-shaped). In generale si utilizza una distribuzione di tipo uniforme (distribuzione rettangolare).

Variazioni delle condizioni ambientali

L'importanza degli effetti della variazione di temperatura impattano non solo sulle dimensioni e composizione degli oggetti sottoposti a misurazione, ma anche sulle macchine di misura. A differenza delle altre componenti termiche, la variazione della temperatura ambiente dipende anche dalla presenza del personale addetto alla misurazione. Uno degli esempi più semplici e significativi che si può fare è quello di un sistema comparatore per la taratura di blocchetti piano paralleli (figura 1). Il sistema è formato da tre elementi: il blocchetto da

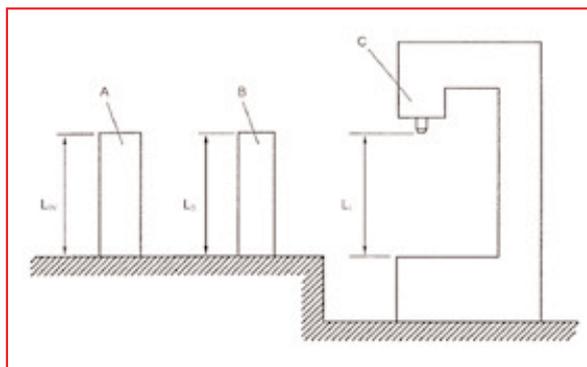


Figura 1 - Sistema di misura basato su comparazione formato da tre elementi: A) elemento da tarare; B) campione di riferimento; C) comparatore

tarare di lunghezza L_W il campione di riferimento di lunghezza L_S ed il comparatore la cui lunghezza caratteristica è pari ad L_i . Il processo di misurazione consiste nel far acquisire inizialmente alla lunghezza caratteristica del comparatore il valore L_S del campione di riferimento e successivamente confrontare quest'ultimo con il valore L_W del blocchetto da tarare. A causa delle variazioni di temperatura, esiste un continuo scambio di calore tra tut-

ti e tre gli elementi che non avranno mai simultaneamente la stessa temperatura. Anche se le costanti di tempo fossero le stesse e le temperature uguali, essi potrebbero non avere la stessa lunghezza, eccetto nel caso in cui si trovassero tutti alla temperatura di 20 °C, a causa dei differenti valori dei coefficienti di dilatazione lineare. Per ogni elemento la combinazione di (i) costante di tempo, (ii) lunghezza (rispettivamente L_S e L_W), (iii) lunghezza caratteristica (L_i), (iv) coefficiente di dilatazione termica lineare (α_W e α_S), determina la risposta dimensionale alla variazione di temperatura ambiente.

La figura 2 mostra tale risposta per un'ipotizzata variazione sinusoidale della temperatura ambiente; per semplicità gli elementi sono costituiti dallo stesso materiale ma hanno differenti costanti di tempo: la maggiore relativa al blocchetto in taratura, la minore relativa al blocchetto campione e la costante del comparatore compresa tra le due precedenti. Come si evince dalla figura 2 le tre risposte hanno ampiezze e fasi differenti, d'altra parte se fosse possibile ottenere tali dati (occorrerebbe un apparato in grado di non risentire delle variazioni di temperatura) risulterebbe facile risalire agli effetti dei gradienti termici sulle fasi della misurazione. Infatti supponendo di misurare al tempo t_{m1} la lunghezza del campione di riferimento ($L_i = L_S$), la curva di risposta del comparatore trasla parallelamente a se stessa (curva tratteggiata) fino a diventare tangente a quella del blocchetto campione (il sistema comparatore-campione ha nell'istante t_{m1} la stessa risposta dimensionale).

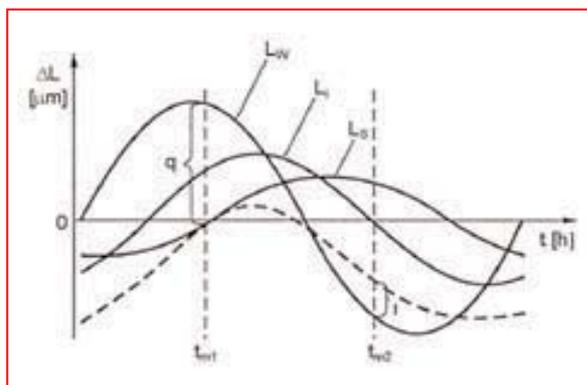


Figura 2 - Risposta dimensionale del sistema illustrato nella figura 1 ad una variazione sinusoidale di temperatura

Se la lunghezza (misurata) del campione fosse confrontata nello stesso istante con la lunghezza del blocchetto da tarare, quest'ultima risulterebbe maggiore di un'aliquota q . Se invece il confronto dimensionale avvenisse al tempo t_{m2} la lunghezza del blocchetto in taratura risulterebbe minore di un'aliquota r . Poiché la variazione di temperatura causa una variazione delle differenze della lunghezza e delle lunghezze

caratteristiche, è possibile dividere il sistema composto da tre elementi in due sottosistemi a due elementi. La figura 3 mostra le due curve risultanti dalla sottrazione della lunghezza caratteristica del comparatore da quella del blocchetto da tarare ($L_W - L_i$) e del campione ($L_S - L_i$). Per un caso reale i dati necessari alla costruzione di tali curve si ottengono attraverso test di deriva durante le fasi di confronto comparatore-campione e comparatore-blocchetto da tarare, oltre a dati addizionali neces-

sari a determinare la relazione tra la sfasatura delle curve ottenute dai test di deriva. Poiché i dati espressi in figura 3 sono stati ottenuti attraverso quelli di figura 2, non vi è incertezza riguardo le fasi delle curve e l'errore apportato dalla variazione di temperatura può essere estratto facilmente. Per esempio considerando un ciclo di settaggio espletato tra i tempi t_{m1} e t_{m2} , ed effettuando i confronti senza ritardo, l'errore che si commette (q) si ottiene come differenza tra le due curve.

L'effetto del settaggio è quello di stabilire una nuova linea di riferimento alla quale riferire il comparatore al tempo t_{m1} (linea "oo" in figura 3). Quindi se la lunghezza del blocchetto in taratura viene misurata tra i tempi t_{m1} e t_{m2} le deviazioni dovute alle variazioni di temperatura sono comprese nel range $[+q, -r]$. Se i tempi di settaggio sono sconosciuti e non prevedibili (aleatori), e il processo di misurazione è molto breve (settaggio prima di ogni misurazione e ritardo trascurabile tra questo e la misurazione), la deviazione che può verificarsi è di $\pm x$, ovvero la distanza massima tra le due curve. A causa del breve tempo in cui viene effettuata la misurazione, il comparatore non contribuisce alla deviazione:

$$(L_W - L_i) - (L_S - L_i) = L_W - L_S$$

La deviazione dipende, quindi, unicamente dalla differenza tra la deriva del sistema campione-comparatore e quella del sistema blocchetto da tarare-comparatore ed il tempo al quale viene eseguita la misurazione. Se il processo di misura impegna un tempo maggiore del periodo dell'oscillazione della temperatura, la massima deviazione possibile vale $\pm E_{TVE}$, oppure la differenza massima tra le due curve di deriva all'istante considerato (generalmente risulta $E_{TVE} > x$).

Il condizionamento di un laboratorio di metrologia

Dall'analisi teorica svolta risulta evidente che, al fine di ottenere misure di lunghezza entro prestabiliti limiti di incertezza (indipendentemente dal sistema di misura adoperato), occorre controllare la temperatura, le sue fluttuazioni nel tempo e i suoi gradienti nello spazio.

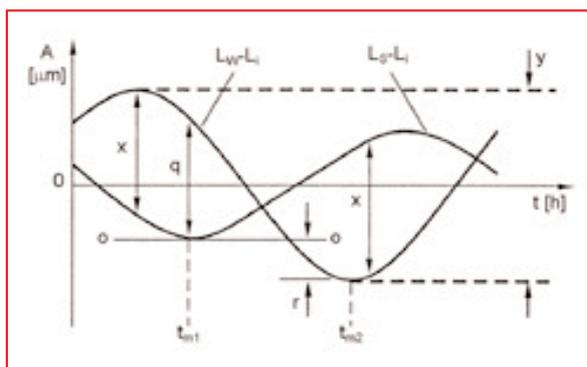


Figura 3 - Deriva relativa tra i componenti di un sistema a tre elementi

Inoltre, è buona norma controllare anche le possibili fluttuazioni dell'umidità relativa (UR), in quanto possono provocare effetti indesiderati sui componenti del sistema di misura. I suddetti requisiti termoigrometrici, nonché le prerogative dettate dalla normativa Uni-En-Iso 17025 [5], impongono quindi l'adozione di idonei impianti di climatizzazione nei laboratori accreditati di metrologia dimensionale. Al fine di evidenziare la particolare delicatezza degli aspetti

legati al controllo dei parametri termoigrometrici, nelle figure 4a) e 4b) vengono riportati rispettivamente gli andamenti tipici dell'umidità relativa e della temperatura in un locale chiuso (ad uso laboratorio) condizionato tramite una semplice pompa di calore di tipo "split" (electrical heat pump). Come si può osservare, questo tipo di condizionatore non è assolutamente in grado di assicurare una distribuzione stabile ed uniforme dei valori termoigrometrici, relativamente all'applicazione in questione. Se ne deduce che è indispensabile realizzare un adeguato impianto di climatizzazione, con una sofisticata unità di controllo per l'impostazione ed il mantenimento dei

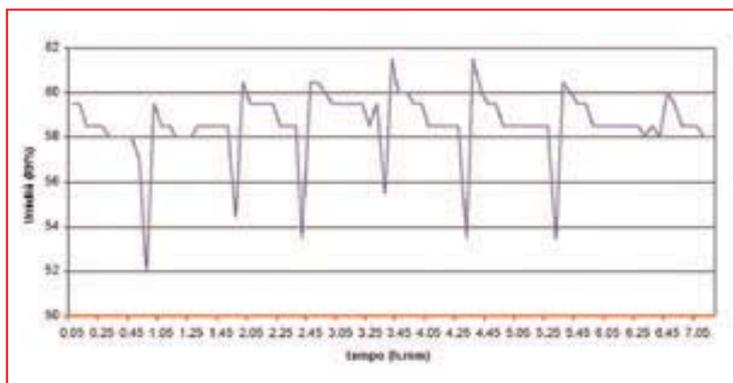


Figura 4a) - Andamento dell'umidità relativa (RH%) nel tempo in un locale chiuso condizionato con una pompa di calore di tipo "split"

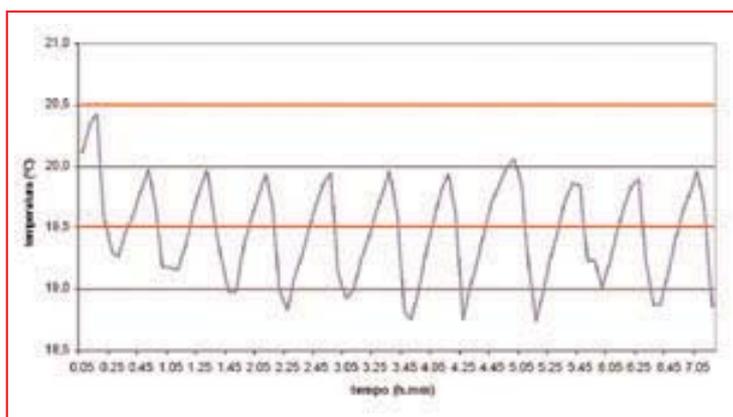


Figura 4b) - Andamento della temperatura nel tempo in un locale chiuso condizionato con una pompa di calore di tipo "split"

Nomenclatura

E_{TVE}	Variazione dimensionale dovuta alle fluttuazioni della temperatura ambiente	$u(\theta_w)$	Incertezza della temperatura del misurando
L_m	Valore non corretto della misura di lunghezza	$u(\theta_s)$	Incertezza della temperatura del campione
L_s	Lunghezza media del blocchetto campione	$u_{CT}(L)$	Componente dell'incertezza dovuta agli effetti termici
L_w	Lunghezza media del blocchetto in taratura	$u_{DE}(L)$	Incertezza dell'espansione termica differenziale
TE	Thermal Error	$u_{TM}(L)$	Incertezza dovuta alle misure di temperatura
TEI	Thermal Error Index	$u_{ETVE}(L)$	Incertezza dovuta alle fluttuazioni della temperatura
TOL	Semiampiezza del campo di tolleranza	α_w	Dilatazione termica lineare del misurando
$u(\alpha_w)$	Incertezza del coefficiente di dilatazione termica lineare del misurando	α_s	Dilatazione termica lineare del campione
$u(\alpha_s)$	Incertezza del coefficiente di dilatazione termica lineare del campione	X_m	Misurando
		X_{st}	Campione
		θ_s	Temperatura media del blocchetto campione
		θ_w	Temperatura media del blocchetto in taratura

valori di *set-point* della temperatura e di UR. Analogamente, molta attenzione deve essere posta da parte del progettista dell'impianto nel *lay-out* della distribuzione dei flussi d'aria e nella localizzazione delle bocchette di aerazione e di ripresa, al fine di evitare possibili stratificazioni ed il diretto contatto dei flussi d'aria con le macchine di misura. Nelle figure 5a) e 5b) vengono infine illustrati gli andamenti dell'umidità relativa e della temperatura, registrati nello stesso locale chiuso adibito a laboratorio, in seguito ad una riprogettazione ed instal-

lazione di un idoneo impianto di climatizzazione: come si può osservare le inevitabili oscillazioni dei parametri intorno al *set-point* sono contenute all'interno di una fascia di valori compatibili con l'applicazione di metrologia dimensionale.

Conclusioni

Dall'esame della più recente normativa in materia di metrologia dimensionale, si deduce che il parametro d'influenza avente il maggior peso nell'analisi dell'incertezza dovuta ad errori di tipo sistematico è la temperatura. Al fine di ottenere misure dimensionali che non siano affette da un elevato valore di incertezza, è necessario controllare adeguatamente la temperatura sia nel tempo sia nello spazio. D'altra parte, la valutazione dell'incertezza globale legata agli effetti termici (u_{CT}) richiede la misurazione accurata non solo della temperatura ambiente, ma anche quella dei componenti del sistema di misura. Pertanto, in un laboratorio accreditato di misure dimensionali è necessario dotarsi: di un adeguato impianto di climatizzazione che garantisca una distribuzione dei parametri termoigrometrici il più stabile ed uniforme possibile; di una idonea strumentazione di misura della temperatura e dell'umidità relativa (da tarare periodicamente), sia per il monitoraggio in continuo delle condizioni ambientali all'interno del laboratorio, sia per il controllo della temperatura del misurando e dei componenti del sistema di misura.

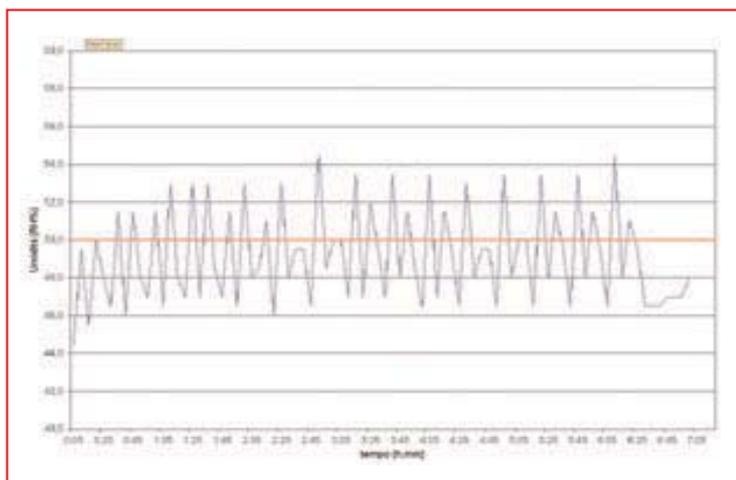


Figura 5a) - Andamento dell'umidità relativa (RH%) nel tempo in un locale chiuso condizionato con un impianto di climatizzazione adeguato

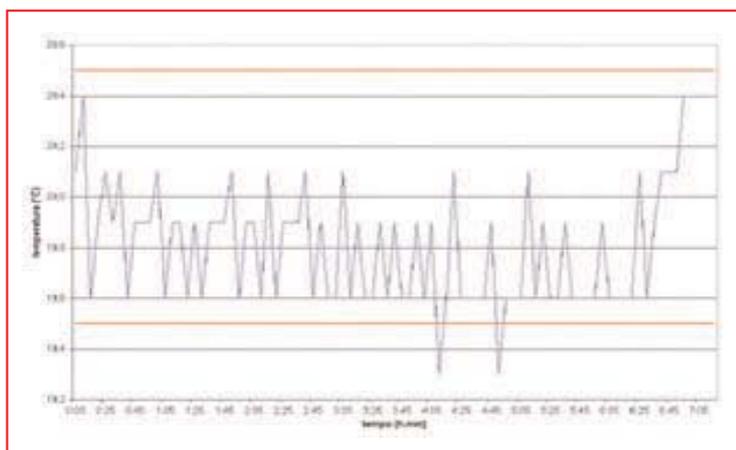


Figura 5b) - Andamento della temperatura nel tempo in un locale chiuso condizionato con un impianto di climatizzazione adeguato

Riferimenti

- [1] "Guide to the expression of Uncertainty in Measurements (Gum)", Iso, 1995, Geneve.
- [2] Iso 5725, "Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results", Iso, 1994, Geneve.
- [3] Iso/Tr 16015, "Geometrical product specifications (Gps) - Systematic errors and contributions to measurement uncertainty of length measurement due to thermal influences", Iso, 2003, Geneve.
- [4] A. Balsamo, "Dove misurare temperatura per misurare dimensioni", Tutto Misure n. 4, 2003, pp. 356-358.
- [5] Iso/Iec 17025, "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories", Iso, 1999, Geneve.