

# TARARE I TERMOMETRI DI UNA CMM NON È SEMPRE UNA BUONA IDEA

di Alessandro Balsamo (\*)

## Introduzione

Gli effetti termici sono notoriamente fra i più importanti nelle misurazioni dimensionali: inutile profondere sforzi nel misurare e denaro per acquistare e mantenere strumentazione accurata se non in un ambiente di lavoro adeguato termicamente. La ragione è evidente: tutti i materiali si espandono o contraggono al variare della loro temperatura. Ciò vale anche per quelli di cui son fatti gli strumenti di misura, ad esempio le CMM, e i pezzi o i campioni in misura. Le loro dimensioni cambiano al variare della temperatura, al punto che non ha senso fornire un risultato di misura dimensionale se non si precisa a quale temperatura esso si riferisca. Non a caso, la prima norma tecnica pubblicata dall'ISO nel 1954 [1] fu proprio per stabilire una temperatura normale di riferimento a 20 °C. Molti decenni sono passati da allora, e negli anni questo valore è stato confermato da tutte le successive revisioni della ISO 1, fra cui la terza e ultima nel 2016 [2] (per un approfondimento sull'evoluzione di questa norma, si veda [3], di libera consultazione). Gli effetti termici sono complessi da analizzare e prevedere. Quando un corpo sia fatto di materiale omogeneo e la sua temperatura sia uniforme nello spazio e stabile nel tempo, allora vale la nota relazione d'espansione lineare

$$l = l_0(1 + \alpha\tau), \quad \tau = t - t_0$$

che afferma che la dimensione  $l$  di un corpo a temperatura  $t$  cresce o diminuisce rispetto a quella,  $l_0$ , a temperatura di riferimento  $t_0$  di una quantità  $l_0\alpha\tau$ , in cui  $\alpha$  è il coefficiente d'espansione termica caratteristico del materiale, e  $\tau$  lo scostamento di  $t$  da  $t_0$ .

In altri termini, la dimensione di un corpo è una funzione lineare della sua temperatura, passante per il valore assunto alla temperatura di riferimento con pendenza pari al coefficiente d'espansione termica del materiale. Poiché per la maggior parte dei materiali il coefficiente  $\alpha$  a temperatura ambiente è positivo, la maggior parte dei corpi s'espandono al crescere della temperatura e si contraggono al decrescere. L'effetto più visibile è una variazione del volume del corpo.

La situazione si complica quando il corpo sia di materiale non omogeneo e/o quando la temperatura non sia uniforme. Un esempio del primo caso è una moneta bimetallica, oppure un

dispositivo costruito in parte in alluminio e in parte in acciaio; un esempio del secondo è la presenza di una sorgente di calore concentrata che riscalda il corpo da un lato, generando un gradiente spaziale. In questi casi, il prodotto  $\alpha\tau$ , che quantifica l'espansione/contrazione proporzionale locale, non è costante in tutti i punti del corpo: alcune porzioni si espanderanno/contrarranno di più di altre, producendo una deformazione, cioè un cambiamento di forma. L'aumento/diminuzione del volume complessivo del corpo s'accompagna ad una variazione della sua geometria. Ancor più complicato il caso dinamico, in cui s'aggiunge una variazione della temperatura nel tempo. Il calore impiega tempo per propagarsi all'interno di un materiale modificandone la temperatura locale. La conduzione termica dinamica è regolata dalla legge di Fourier, che è un'equazione differenziale alle derivate parziali; nei casi pratici, difficilmente si riesce a prevedere l'andamento in modo utile per una correzione efficace.

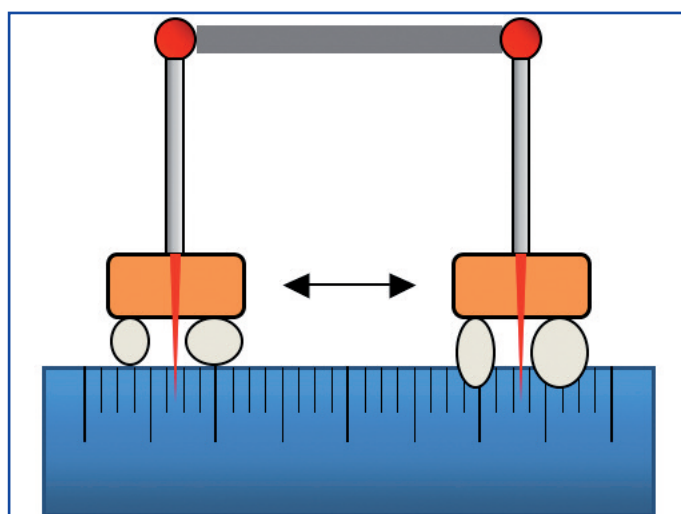


Figura 1: Rappresentazione schematica della misura lungo un asse della CMM

(\*) INRiM - Istituto Nazionale Ricerca Metrologica - Divisione di Meccanica - Responsabile Programma d'Ingegneria di Precisione

La manifestazione visibile di questo fenomeno è la continua variazione di volume e forma del corpo. Se la sollecitazione termica cui è sottoposto il corpo è ciclica, come avviene ad esempio in un ambiente condizionato da un dispositivo che attacca e stacca un gruppo frigorifero per regolare la temperatura, allora il corpo pulsa dimensionalmente.

Nel seguito ci occuperemo soltanto del primo e più semplice caso. In altre parole supporremo che l'ambiente di lavoro sia condizionato a sufficienza e che al pezzo in misura sia stato concesso un tempo di stabilizzazione sufficiente a portarsi in equilibrio termico. Affronteremo in particolare il caso delle CMM dotate di compensazione termica.

### Il caso delle CMM

Per semplicità, consideriamo un solo asse; i risultati saranno facilmente estesi al caso completo 3D. La situazione è rappresentata schematicamente in figura 1.

Il carrello corrispondente all'asse si muove fra due punti, in corrispondenza dei quali il tastatore è posto a contatto con il pezzo da misurare. Per ciascun punto, la scala misura la coordinata (a meno del raggio dell'elemento di contatto dello stilo, che non interessa esaminare qui). Abbiamo dunque due corpi che intervengono nella misura: oltre al pezzo in misura, la scala della CMM. Ciascuno è soggetto a dilatazione termica lineare, e dunque possiamo scrivere due equazioni:

$$\begin{cases} l_p = l_{0p}(1 + \alpha_p \tau_p) \\ l_s = l_{0s}(1 + \alpha_s \tau_s) \end{cases}$$

dove i pedici p ed s si riferiscono rispettivamente al pezzo e alla scala. Il misurando, cioè la quantità d'interesse per la misura, è  $l_{0p}$ , cioè la dimensione del pezzo alla temperatura normale di riferimento. La scala non può che restituire le letture derivate dai tratti che porta impressi, che si suppongono esatti alla temperatura normale di riferimento; dunque, la scala restituisce  $l_{0s}$ . Quanto il tastatore sia posto a contatto con il pezzo, allora le due dimensioni, del pezzo  $l_p$  e della scala fra due letture  $l_s$ , alle temperature effettive di misura, rispettivamente  $t_0 + \tau_p$  e  $t_0 + \tau_s$ , sono uguali,  $l_p = l_s$ . Eguagliando le due espressioni si ottiene

$$l_{0p}(1 + \alpha_p \tau_p) = l_{0s}(1 + \alpha_s \tau_s)$$

Si ricava facilmente

$$l_{0p} = l_{0s} \frac{1 + \alpha_s \tau_s}{1 + \alpha_p \tau_p} \approx l_{0s}(1 + \alpha_s \tau_s - \alpha_p \tau_p)$$

dove l'ultima uguaglianza è ricavata mediante approssimazione del prim'ordine, che vale quando i corpi si espandono/contraggono proporzionalmente di una quantità piccola,  $|\alpha_s \tau_s| \ll 1$  e  $|\alpha_p \tau_p| \ll 1$ ; nei casi pratici, quasi sempre.

Dunque, per ottenere il valore del misurando occorre apportare alla lettura della scala una correzione termica per l'espansione della scala e del pezzo, di segno opposto. Per questa ragione, molte CMM sono dotate di termometri sulle scale e uno libero da

applicare al pezzo, per misurare  $\tau_s$  e  $\tau_p$ . Il coefficiente termico della scala  $\alpha_s$  è noto al costruttore e registrato una volta per tutte, mentre quello del pezzo  $\alpha_p$  viene richiesto di volta in volta all'utilizzatore. In queste condizioni, è possibile effettuare la correzione, che normalmente avviene in modo trasparente senza coinvolgimento dell'utilizzatore.

La CMM effettua però anche un altro tipo di correzione: quella degli errori di geometria. Il modello della correzione è noto dagli anni '70 [4], e può essere scritto elegantemente in forma vettoriale [5,6,7]. Non interessano qui i dettagli; interessa però notare che, di tutte le funzioni d'errore presente nel modello, ve n'è una per asse che modella una componente d'errore lungo l'asse come funzione della variabile corrente dell'asse stesso. Si tratta dei tre cosiddetti *errori di scala*, rappresentati talvolta come  $t_{xx}$ ,  $t_{yy}$ ,  $t_{zz}$ . Come vedremo, queste funzioni interferiscono con la correzione termica.

In figura 2 è rappresentata una funzione d'errore di scala, che può essere decomposta in un termine lineare e nella rimanenza.

Dunque, avviene una correzione geometrica data da

$$c_s = -k_s s_2 - c(s_2) + k_s s_1 + c(s_1) = -k_s l_{0p} - c(s_2) + c(s_1)$$

dove  $s_1$  e  $s_2$  sono le coordinate dei due punti misurati, e  $c(s_1)$  e  $c(s_2)$  le correzioni di geometria lungo  $x$  in tali punti, a meno del termine lineare. Le correzioni termica e geometrica lungo  $s$  sono effettuate contemporaneamente dalla CMM, e si sommano a formare il risultato finale:

$$l_{0p} = l_{0s}(1 + \alpha_s \tau_s - \alpha_p \tau_p) - k_s l_{0p} - c(s_2) + c(s_1)$$

Raggruppando i termini lineari, s'ottiene infine

$$l_{0p} = l_{0s}[1 + (\alpha_s \tau_s - k_s) - \alpha_p \tau_p] - c(s_2) + c(s_1)$$

Questa equazione afferma che la compensazione della scala  $\alpha_s \tau_s$  e il coefficiente della correzione geometrica lineare  $k_s$  si sommano direttamente mischiando i loro effetti in modo inseparabile. Se un termometro della scala commettesse un errore sistematico  $\delta \tau_s$ , ad esempio per difetto di taratura, basterebbe aggiungere un termine lineare con pendenza  $k_s = \alpha_s \delta \tau_s$  alla correzione dell'errore di scala per annullare completamente l'effetto.

Lo stesso non si può dire invece per il termometro del pezzo, perché il termine lineare  $k_s = \alpha_p \delta \tau_p$  non sarebbe fisso ma variabile a seconda del pezzo: il materiale della scala (e quindi  $\alpha_s$ ) è sempre lo stesso, mentre quello del pezzo (e quindi  $\alpha_p$ ) no.

### Tarare o non tarare?

Tarare un qualsiasi strumento indicatore o campione significa determinarne la risposta (l'indicazione per uno strumento indicatore, il valore effettivo per un campione) per riferimento a valori noti e riferibili a valori riconosciuti (tipicamente le unità di misura del Sistema Internazionale SI), per dar modo d'apportare opportune correzioni nell'uso. Quando la correzione non sia possibile o pratica, allora si prestabilisce una specifica per lo strumento indicatore (MPE, Massimo Errore Ammissibile) o per il campione

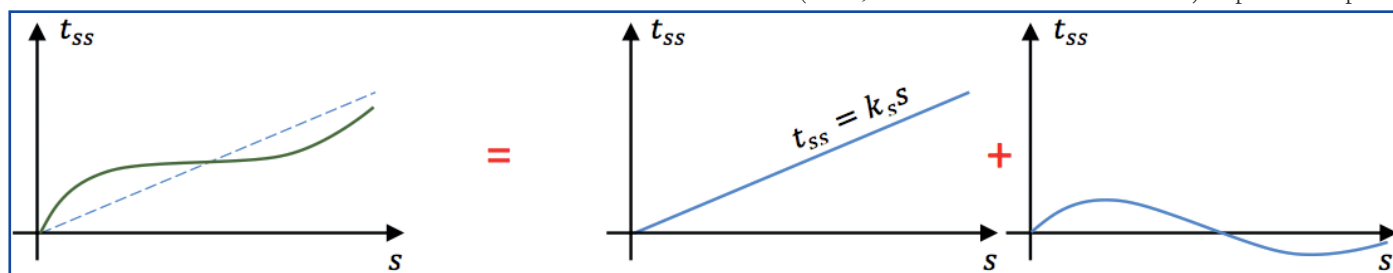


Figura 2: Estrazione da una funzione di scala di una componente lineare.  $s$  è il generico asse, e può valere  $x$ ,  $y$ , o  $z$

(tolleranza) adeguata allo scopo della misura, e si procede ad una verifica della prestazione entro i limiti di specifica, sempre per riferimento a valori noti e riferibili a valori riconosciuti. In entrambi i casi, le misure ottenute con lo strumento o campione risulteranno anch'esse riferibili<sup>1</sup>: nel caso della taratura, dopo aver apportato la correzione ed entro l'incertezza di taratura; nel caso della verifica, senza apportare correzioni ed entro l'incertezza corrispondente alla specifica prestabilita<sup>2</sup>.

In generale, la taratura o verifica periodica sono una garanzia d'affidabilità delle misure; in mancanza, chi può garantire che lo strumento funzioni come atteso, e che non sia stato soggetto a derive, accidenti, sregolazioni? Siccome le tarature e verifiche costano, la bramosia di risparmio immediato porta spesso a non effettuarle, o ad effettuarle poco e in modo non periodico e programmato, senza attenzione al fatto che cattive misure che ne possono derivare potrebbero avere conseguenze economiche, legali o di prestigio di costo ben maggiore di quello per la taratura o verifica.

Concentriamoci ora sui termometri delle CMM. Devono dunque essere tarati o verificati periodicamente? La risposta a questa domanda è: sì e no, a seconda dei casi.

Consideriamo l'effetto delle correzioni di geometria. Esse sono effettuate sulla base di un insieme di valori registrati nel controllo della CMM o nel software di misura e interfaccia; esso descrive una specifica CMM affetta da specifici errori di geometria. Per questa ragione, è talvolta chiamato *mappa d'errore* della CMM. Questi valori sono determinati mediante indagine sperimentale specifica: alla consegna di una CMM nuova e in seguito durante apposite sessioni periodiche, ad opera di tecnici qualificati e dotati della necessaria attrezzatura. I metodi per derivare le mappe d'errore sono vari (per una panoramica si veda [8]); in modi differenti, tutti si basano sul confronto delle indicazioni della CMM non compensata geometricamente con valori noti e riferibili a valori riconosciuti, resi disponibili ad esempio da blocchetti pianparalleli, calibri a passi, interferometri, ecc., tarati. La questione dei termometri della CMM si gioca principalmente in questa fase.

Un buon tecnico compensatore svolgerà le necessarie misurazioni con la compensazione termica delle scale attiva: eventuali errori strumentali dei termometri scala saranno così incorporati nella, e corretti dalla, mappa d'errore (mediante termini lineari delle tre funzioni degli errori di scala). In altre parole, poiché in ultima istanza questi termometri non servono a fornire una misura della temperatura ma a quantificarne l'effetto dimensionale, la riferibilità termica non è necessaria perché sostituita da quella dimensionale introdotta dalle attrezzature utilizzate per determinare la mappa d'errore. Sarebbe un grave errore non attivare la compensazione termica delle scale in questa fase. Ciò sarebbe corrispondente ad avere le compensazioni attive e termometri che sempre restituiscono la temperatura normale di riferimento (dando così origine a compensazione nulla), commettendo dunque un errore pari a  $-\tau_s$ . L'effetto di quest'ultimo sarebbe incorporato nella mappa d'errore; e ciò comporterebbe nell'uso, quando la compensazione è invece normalmente attiva, un macroscopico errore proporzionale pari a  $\alpha_s(\delta\tau_s - \tau_{sc})$ , dove  $\delta\tau_s$  è l'errore sistematico del termometro e  $\tau_{sc}$  lo scostamento di temperatura della scala rispetto alla temperatura normale di riferimento durante la compensazione. Inoltre, la procedura di compensazione dura di solito alcune ore o giorni a seconda del metodo e della CMM; durante

tale periodo, la temperatura della scala potrebbe non essere costante, mentre tutti i metodi ipotizzano che lo sia. Ciò provocherebbe effetti imprevedibili sulla qualità della mappa d'errore, spesso assimilabili a rumore di misura aggiuntivo, che sarebbero invece assai ridotti se la compensazione termica delle scale fosse attiva durante la determinazione della mappa d'errore.

La situazione è diversa per la compensazione termica del pezzo. Durante la determinazione della mappa d'errore, il valore di riferimento misurato con cui confrontare l'indicazione della CMM non (ancora) compensata è idealmente quello alla temperatura normale di riferimento. Quando ciò accada, la compensazione termica del pezzo dovrebbe essere disattiva, perché nulla più sarebbe da correggere. Nell'uso, la compensazione termica del pezzo sarà attiva e s'incaricherà di correggere l'espansione/contrazione per ogni specifica temperatura incontrata. Quando invece il valore di riferimento utilizzato sia quello alla temperatura effettiva durante la determinazione della mappa d'errore, allora la compensazione termica del pezzo dovrebbe essere attiva, per riportare al meglio tale valore alla temperatura normale di riferimento. Esaminiamo meglio le due alternative:

#### 1. Compensazione termica del pezzo disattiva durante la determinazione della mappa d'errore.

Sarà cura del tecnico compensatore utilizzare il valore di riferimento alla temperatura normale di riferimento. Se tale valore è determinato mediante un campione materiale tarato, allora egli dovrà misurare la sua temperatura mediante termometri tarati aggiuntivi, ed effettuare una correzione rispetto al valore di taratura. Se invece s'utilizzano campioni immateriali, ad esempio un interferometro, allora tale correzione non sarà necessaria<sup>3</sup>. Nell'uso, l'errore proporzionale termico sarà pari a  $\alpha_p\delta\tau_p$ ; se il termometro pezzo è affetto da errore sistematico, il suo effetto rimarrà invariato a valle della compensazione di geometria.

#### 2. Compensazione termica del pezzo attiva durante la determinazione della mappa d'errore.

Se la determinazione della mappa d'errore è effettuata con campioni materiali tarati, allora il valore di riferimento da utilizzare nella compensazione sarà direttamente quello di taratura. Se è effettuata invece con campioni immateriali che non presentano dilatazione termica, allora si dovrà impostare un coefficiente di dilatazione termica pezzo  $\alpha_p=0$  (di fatto disattivando la compensazione). Nell'uso, l'errore proporzionale termico sarà pari a  $\alpha_p\delta\tau_p - \alpha_{pc}\delta\tau_{pc}$ , dove il pedice aggiuntivo  $c$  indica la fase di determinazione della mappa d'errore (compensazione). Se il materiale del campione utilizzato durante la compensazione è uguale a quello del pezzo in misura,  $\alpha_p = \alpha_{pc}$  (ad esempio entrambi d'acciaio), allora il minimo errore (nullo) si avrà ad una temperatura pari a quella alla quale è stata determinata la mappa d'errore.

### Conclusioni

Gli effetti termici durante le misurazioni con CMM sono complessi, e solo in parte ci si può affidare alla compensazione termica di cui è dotata la CMM. *(continua in ultima pagina)*

1- La riferibilità delle misure s'ottiene soltanto sotto certe condizioni (ambientali, di buon uso, etc.). L'argomento è vasto ed eccede i limiti e l'intenzione di questo articolo. Si suppone qui che tali condizioni siano rispettate.

2- In assenza d'altre informazioni, si assume che il valore sia distribuito uniformemente entro l'intervallo di specifica, e quindi si deriva un'incertezza tipo pari a  $u=T/\sqrt{3}$ , dove  $T$  è la semiampiezza dell'intervallo di specifica.

3- Si dovrà invece effettuare la correzione per l'indice di rifrazione dell'aria, che coinvolge, oltre alla temperatura, anche la pressione e l'umidità. Per approfondimenti, si veda [9].

## Argomenti

(prosegue da pagina 9)

Si raccomanda di prestare sufficiente cura per minimizzare tali effetti, mediante un ambiente condizionato adeguatamente che renda la temperatura uniforme nello spazio e prossima a quella normale di riferimento e mediante opportuna attesa per la stabilizzazione termica del pezzo. Anche in questo caso però gli effetti termici non sono semplici, perché le espansioni/contrazioni lineari coinvolgono congiuntamente le tre scale e il pezzo e per il coinvolgimento inevitabile delle correzioni di geometria.

Si raccomanda ai tecnici che determinano sperimentalmente le mappe d'errore di attivare la compensazione termica delle scale e di disattivare quella del pezzo, avendo cura di misurarne la temperatura con propri termometri tarati e di correggere rispetto al valore di taratura.

Si raccomanda agli utilizzatori di non tarare periodicamente né modificare in alcun modo la lettura dei termometri delle scale, perché questo provocherebbe un errore aggiuntivo, e di confidare invece sulla riferibilità dimensionale dei campioni utilizzati dal tecnico compensatore per superare la mancanza di riferibilità termica di tali termometri. Si raccomanda invece di tarare periodicamente il termometro pezzo, perché nessun aiuto proviene dalla compensazione geometrica. Quando la taratura non sia possibile per ragioni pratiche, ad esempio perché non sia dato modificare i parametri di risposta di tale termometro, si raccomanda almeno di effettuare verifiche periodiche, per controllare che l'errore d'indicazione sia contenuto entro un limite prestabilito idoneo per lo scopo per cui è utilizzata la CMM.

## Riferimenti

- [1] ISO Recommendation R1 (1954) – Standard reference temperature for industrial length measurements, 1st Edition
- [2] UNI EN ISO 1:2016 Specifiche geometriche dei prodotti (GPS) – Temperatura normale di riferimento per la specifica di proprietà geometriche e dimensionali
- [3] S.D. Phillips, C.M. Shakarji, A. Balsamo, M. Krystek, E. Morse, 2016, The 2016 Revision of ISO 1 – Standard Reference Temperature for the Specification of Geometrical and Dimensional Properties, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, vol. 121, p. 498–504. <https://doi.org/10.6028/jres.121.026>
- [4] R. Hocken, J. Simpson, B. Borchardt, J. Lazar, P. Stein, 1977, Three dimensional metrology, Annals of the CIRP 26/2:403–408

- [5] S. Sartori, G.X. Zhang, 1995, Geometric Error Measurement and Compensation of Machines, Annals of the CIRP 44/2:599–609
- [6] A. Balsamo, 1995, Effect of arbitrary coefficients of CMM error maps on probe qualification, Annals of the CIRP 44/1:475–478
- [7] A. Balsamo, 2014, Mappe d'errore di CMM a corpo rigido: teoria, trasformazioni e gradi di libertà, Rapporto Tecnico INRIM 25/2014
- [8] H. Schwenke, W. Knapp, H. Haitjema, A. Weckenmann, R. Schmitt, F. Delbressine, 2008, Geometric error measurement and compensation of machines – An update, CIRP Annals - Manufacturing Technology 57/2:660–675
- [9] A. Balsamo, 2014, Uncertainty of measurement of calibrated test lengths realised by interferometry in ISO 10360-2 testing, INRIM Technical Report 5/2014

**ERRATA CORRIGE** - Nel numero 22 di Probing facciamo ammenda per due errori di stampa commessi sull'articolo di apertura dell'Ing Gabbia a pagina 2:

- a) Il primo errore è relativo al titolo; il codice corretto della norma è ISO 14405-1 e non ISO 14450-1 come erroneamente riportato
- b) Il secondo errore, sempre nello stesso articolo, è relativo alla figura 5 a pagina 3. La didascalia della figura fa riferimento ad un esempio di definizione del diametro dell'elemento derivato tangenziale esterno (modificatore GN); per errore però è stata replicata l'immagine di figura 4 relativa al modificatore GG. L'immagine corretta da inserire come figura 5 avrebbe pertanto dovuto essere la seguente:

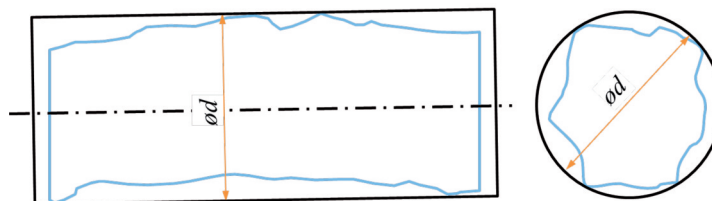


Figura 5: Esempio di definizione del diametro dell'elemento tangenziale esterno GN



## REDAZIONE

### Direttore Editoriale

Annarita Lazzari

### Comitato di redazione

Alessandro Balsamo, Annarita Lazzari, Giovanni Salierno

### Segreteria di redazione

Associazione CMM Club Italia,  
Strada delle Cacce 91  
10135 Torino

### Progetto editoriale

Annarita Lazzari

### Progetto grafico e composizione

Barbara Lunghi

### Pubblicato da

Associazione CMM Club Italia

### Hanno collaborato a questo numero:

Alessandro Balsamo, Paolo Biffi, Roberto Frizza, Pierluca Magaldi, Giovanni Salierno.

In copertina: /

## CONTATTO

Lettere, commenti, osservazioni e richieste possono essere indirizzati a:  
Associazione CMM Club Italia, Strada delle Cacce 91 - 10135 Torino (TO) -  
Tel. 011-3919970 - fax: 011-3919747 - E-mail: [segreteria@cmmclub.it](mailto:segreteria@cmmclub.it)

## CONTRIBUTI

La Redazione accetta e gradisce articoli e notizie, compatibilmente con lo spazio disponibile, riservandosi ogni decisione sul momento e la forma della pubblicazione. Si accettano memorie e deduzioni anche in contrasto con quanto già pubblicato, salvo il diritto di replica da parte degli interessati. La pubblicazione degli articoli non significa riconoscimento da parte del Comitato di Redazione. La responsabilità tecnica e scientifica dei testi pubblicati spetta ai rispettivi autori, le cui teorie ed opinioni non impegnano l'Associazione CMM Club Italia che declina ogni eventuale responsabilità relativa all'uso, alla realizzazione, alle applicazioni delle informazioni e delle notizie pubblicate sotto qualsiasi forma.

La Redazione accetta i titoli degli articoli come indicazione di massima, riservandosi di intervenire sugli stessi in base a criteri di valutazione generale nell'economia del numero. Originali ed illustrazioni ricevuti non sono di regola restituiti. Non si assume nessuna responsabilità per la perdita dei materiali ricevuti.

## RIPRODUZIONI

Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta o trasmessa in nessuna forma od attraverso nessun mezzo, elettronico o meccanico, includendo fotocopie e registrazioni, per nessuno scopo, salvo l'autorizzazione scritta dell'Associazione CMM Club Italia.

I marchi registrati sono riconosciuti ai rispettivi proprietari.

Copyright 1998-2017 Associazione CMM Club Italia. Tutti i diritti riservati.