

## METROLOGÍA DIMENSIONAL

La industria moderna requiere la utilización de procedimientos racionalizados de planificación y producción de las grandes series, que aparecieron con la fabricación de armas y automóviles, cuyo fundamento fue la creación del principio de intercambiabilidad de las piezas, de cuyo concepto madre derivan todos los otros que aceleraron vertiginosamente el desarrollo industrial. Piezas intercambiables son aquellas que al ser reemplazadas por otras sin retoques ni ajustes, no alteran sustancialmente las características de funcionamiento del mecanismo que integran.

Una técnica de verificación o medición bien organizada de piezas intercambiables para todo mecanismo compuesto por un conjunto de ellas, producidas en serie, permite que cualquier ejemplar de tal mecanismo tomado al azar entre sus semejantes, tenga similar eficiencia que los demás, sin ajustarlo o regularlo previamente. La consecuencia de ello es, además de un gran ahorro de tiempo, una importante economía en el costo del material.

En la etapa de diseño de una pieza, antes de fijar o prescribir una determinada precisión, debe tenerse en cuenta el destino de la misma, condiciones de montaje, etc.. Una precisión mas fina que la necesaria, requiere una medición también más precisa, que absorberá más tiempo y requerirá instrumental más costoso, razones suficientes para evitar su adopción.

Para que el control dimensional de las piezas resulte económico, a veces se eligen aparatos que acorten el tiempo de medición. Para ello, debe tenderse al empleo de aparatos automáticos simples de operar, que puedan ser manejados por personal auxiliar para que los especialistas calificados se dediquen a mediciones más delicadas. Pero la economía también descansa en el costo de conservación de calibres fijos, galgas, etc. (elementos para comprobación de las medidas), por lo que deben construirse aparatos y técnicas de medición que disminuyan en lo posible, el número de esos elementos.

En la exactitud de las medidas, además de las características de la pieza a verificar, influyen, en primer lugar, las del aparato de medición y las condiciones previamente fijadas referentes a temperatura, presión de medición y forma de evitar los errores de tipo personal.

Las exigencias actuales de la técnica de medición, en la construcción de máquinas, vienen determinadas por los siguientes factores:

- 1) La exactitud de funcionamiento pretendida para la máquina.
- 2) Aprovechamiento máximo del espacio y del material.
- 3) La intercambiabilidad de las piezas que la componen.
- 4) Una máxima sencillez en el montaje con preparación de mínima duración.
- 5) Una considerable precisión en la fabricación de las piezas.
- 6) La economía mediante métodos de trabajo modernos.
- 7) Disminución del tiempo de medición y del costo de mantenimiento de instrumentos.

Muchas veces se efectúan mediciones de modo antieconómico e inapropiado, cuando al medir se exagera en las reiteraciones, o se lo hace en condiciones incorrectas, o con equipamiento inadecuado. Además, en muchas ocasiones no se dispone de los conocimientos necesarios para llevar a cabo los procesos de medición lo más exacta y racionalmente posible. El puesto de jefe de verificación es de alta responsabilidad, y debe garantizar la resolución siempre científica y totalmente objetiva de todos los problemas que se presentan.

### **Concepto de medición**

Medición es la determinación numérica de una magnitud lineal o angular o la determinación de si una medida es mayor o menor que un valor numérico dado. Otra definición bastante amplia y que involucra además el concepto de verificar es la siguiente: medir es comparar una magnitud determinada con otra de la misma especie. Una tercera: determinar el valor numérico de una magnitud lineal o angular de un componente o conjunto técnico.

También existen procedimientos de medición para otras características geométricas, como: defectos de forma, defectos de posición, conicidad, planedad, rugosidad, etc.

Valga reiterar, que así como no es posible mecanizar una pieza con dimensiones exactas, tampoco es posible efectuar una medición que no lleve consigo una serie de errores. Basta tener la precaución de que la suma de estos errores sea suficientemente menor que la diferencia admisible entre la dimensión de la pieza y la indicada en el plano.

Al elegir el aparato de medición debe tenerse en cuenta lo que se ha de medir (longitudes, ángulos, roscas, formas, tamaño de la cota), material, y mecanizado de la pieza, tipo de superficie (planas, cilíndricas, esféricas etc.), superficies interiores o exteriores; precisión requerida en la medición y tipo de fabricación (piezas sueltas o en gran cantidad). En este último caso, debe distinguirse si se han de medir algunas tomadas al azar o el lote completo, y si la medición ha de realizarse en el taller, sobre la máquina, o en la sala de medición o bien en el laboratorio.

La medición es directa cuando se realiza trasladando sobre la pieza una medida en forma de escala de mediciones como por ejemplo una regla graduada, un pie de rey o un transportador de ángulos. Las medidas pueden leerse directamente sin necesidad de un dispositivo auxiliar. Es indirecta cuando debe relacionarse al aparato de medición con una escala o una pieza de comparación de magnitud conocida, ajena al instrumento, y se obtiene mediante cálculo basado en otras medidas (Ej: longitud total de un eje con 2 tramos de distinto diámetro, sumando la longitud de cada tramo).

Algunos de los tipos de mediciones pueden realizarse son las siguientes:

- 1) Medición de planos
- 2) Medición de longitudes
- 3) Medición de ángulos
- 4) Medición de roscas
- 5) Medición de pasos
- 6) Medición de perfiles macrogeométricos
- 7) Medición de perfiles microgeométricos (rugosidad)
- 8) Medición de saltos

### **Errores en la Medición**

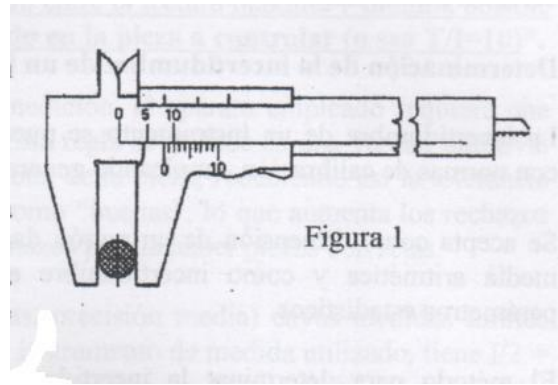
La precisión en la medición solo puede alcanzarse cuando se tienen en cuenta simultáneamente la aptitud de los aparatos, los factores personales, como el tacto y la vista, así como las temperaturas de la pieza y del aparato, y sus respectivos materiales.

La imprecisión tiene, en los distintos aparatos, causas diferentes.

Si se toma como ejemplo más sencillo la medición del diámetro de un eje cilíndrico con un calibre de boca de tipo corriente (figura 1), mejor designado como pie de rey, pie de coliza, o calibre sistema limbo-vernier, se encontrarán las siguientes causas que influyen en la imprecisión de la medida:

- 1) La calidad de fabricación del calibre.
- 2) La calidad de fabricación del aparato de medición con el que ha sido verificado el calibre.

- 3) El error de medición inherente a dicha verificación.
- 4) El desgaste y estado general del calibre.
- 5) La apertura elástica del calibre de boca a consecuencia de la presión de medición en el contacto.
- 6) La deformación elástica o aplanado de las superficies de la pieza y del calibre debido a la presión de medición.
- 7) Variación de las dimensiones por efecto de la temperatura.
- 8) El error de contacto que se origina porque las superficies de la pieza y del calibre no se hallan en contacto directo, sino separados entre sí por una capa de aire o lubricante.
- 9) El error personal (tacto).



### Tipos de Errores

Se distinguen dos clases de errores de medición: **sistemáticos** y **aleatorios**.

**Errores sistemáticos:** Son los que permanecen constantes, en valor absoluto y signo, al medir una magnitud en las “mismas” condiciones de método, mismo operador y laboratorio. Pueden determinarse por un contraste frecuente del instrumento y un estudio crítico del método experimental, y luego eliminarse, corrigiendo el resultado de la medida, sumando (o restando) al valor leído el error de signo negativo o positivo respectivamente. La determinación del error sistemático está afectada por la incertidumbre propia del método utilizado, teniendo por ello una componente aleatoria.

Se deben a imperfecciones del aparato de medida y a veces al principio mismo de medición. Por ejemplo una regla graduada con divisiones muy separadas daría sistemáticamente una medida de baja precisión o un defecto de cero.

**Errores aleatorios:** varían de forma imprevisible, en valor absoluto y signo, al efectuar un gran número de mediciones de una magnitud constante en condiciones prácticamente “idénticas” (laboratorio, método y operador). Se deben generalmente al diseño y deficiencias de fabricación del instrumento y a la común fluctuación sensorial del operador (agudeza visual, tacto, pulso). Al contrario que los sistemáticos, no son constantes en magnitud ni en signo. Son puramente aleatorios y por ello no pueden eliminarse, pero sí reducirse aumentando el número de observaciones.

Los resultados de reiterar medidas de una misma magnitud presentan cierta dispersión y también una parte importante de ellos suelen presentarse relativamente agrupados, por lo que es habitual aceptar como valor medio de dicha magnitud o valor más probable, la media aritmética de las medidas realizadas. Se deduce, y se acepta convencionalmente, que nunca se conocerá el valor verdadero de la medida. Por lo tanto las repetidas mediciones de una misma magnitud en “condiciones prácticamente iguales” adquieren naturaleza estadística.

### Incetidumbre de una medida

La incertidumbre (**I**), cantidad que representa la indeterminación de una medida, es un elemento imprescindible a tener en cuenta en toda medida de precisión. Si el valor medio de repetidas mediciones es **L**, el resultado de la medición puede expresarse como:

$$L \pm I/2$$

Esa expresión supone una distribución simétrica de los sucesivos valores medidos, respecto del valor más probable, lo que es aceptado para la mayor parte de las mediciones. Por lo que la incertidumbre

(I) es la amplitud total intervalo ( $L-I/2$ ,  $L+I/2$ ) en el que cabe esperar que se encuentre el valor verdadero de la magnitud.

### **Determinación de la incertidumbre de un instrumento**

La incertidumbre de un instrumento se puede determinar mediante sucesivas mediciones, conforme con normas de calibración, empleando generalmente patrones de alta precisión.

Se acepta como dimensión de un patrón dado, obtenido por una serie de mediciones, el valor de la media aritmética y como incertidumbre el error límite de la misma, que se calcula mediante parámetros estadísticos.

El método para determinar la incertidumbre de un instrumento, es indudablemente mucho más riguroso que para la medición de una pieza, por lo cual la I del instrumento es siempre menor.

Nota: Sin contar los efectos ambientales, y otras influencias de factible corrección que pueden separarse de la I de la medida, asumiremos para la misma el valor de la I del instrumento surgida de la calibración, o bien la que suministran los fabricantes como dato, ya sea como el intervalo I completo o como el semi-intervalo  $6I/2$ . El dato que informan casi siempre los fabricantes llamándole “incertidumbre”, o simplemente “precisión”, a efectos de su cómputo, debe considerarse como el semi-intervalo (6).

### **Tolerancia de fabricación y tolerancia corregida**

Ya se mencionó la necesidad de intercambiabilidad en la fabricación de piezas mecánicas, y la imposibilidad de obtener piezas cuya forma y dimensiones resulten idénticas. Se debe admitir por lo tanto una variación de medidas entre piezas supuestamente iguales de una producción seriada, y asimismo una variación distinta entre diferentes cotas de la misma pieza.

La Tolerancia de fabricación (T) se especifica en los planos, y es la desviación admitida para una dimensión, que no afecta la funcionalidad e intercambiabilidad de las piezas en el conjunto que integran, teniendo en cuenta la factibilidad del montaje y funcionamiento correcto durante un tiempo preestablecido. Generalmente, las cotas del plano corresponden a una Temperatura de referencia normalizada (20°C).

Si la lectura (valor numérico de la medición) cae dentro de la tolerancia pero muy cercana a uno de los valores límites admisibles, el valor verdadero podría estar fuera de tolerancia. Así se define como Tolerancia corregida ( $T_c$ ) al valor que resulta de disminuir la tolerancia de fabricación (T) en la máxima diferencia (I) de lecturas que presenta el instrumento de medida para esa cota. Entonces:

$$T_c = T - I$$

La  $T_c$  abarca un rango de medidas dentro del cual caben todos los valores leídos en sendas mediciones, correspondientes a todas las piezas que serán aceptadas como buenas.

### **Regla de Oro de la metrología**

La primera tendencia del mecánico es adoptar instrumentos de medición de la máxima exactitud a su alcance. La segunda tendencia natural es reflexionar sobre los precios elevados de los mismos y su deterioro posible, lo que conduce a elegir uno más económico y, generalmente, de menor exactitud.

El difícil acuerdo entre estas dos tendencias opuestas ha sido resumido por muchas generaciones de metrologistas en la “**Regla de oro de la metrología**”, que expresa que:

**“El instrumento debe tener una incertidumbre (intervalo entre la lectura máxima y mínima posible de una medición) del orden de 1 décimo del error tolerado en la pieza a controlar (o sea  $T/I=10$ )”.**

Dicho de otra forma: cualquiera sea la naturaleza de la medición, el aparato empleado requiere una precisión 10 veces mayor que la prescrita para la pieza. Esta regla se traduce en una verdad intuitiva: la incertidumbre del aparato debe restarse a la tolerancia total de la pieza, reduciendo así la tolerancia para el operario, evitando que piezas “malas” se acepten como “buenas”, lo que aumenta los rechazos y el costo de la producción. Se debe notar que entre los rechazos podría haber piezas correctas.

Consideremos la ejecución de un eje 80h8 (según normas, precisión media) cuyas medidas límites (máxima y mínima) son:  $D=80,000$  y  $d=79,954$ mm. Si el instrumento de medida utilizado, tiene  $I/2 = \pm 5\mu\text{m}$ , vemos que una lectura ubicada en los pequeños intervalos de  $5\mu\text{m}$  debajo del máximo y encima del mínimo podría corresponder a una medida real fuera de la tolerancia de la pieza (fig.2). Por ejemplo, si se permitiera descender la medida del diámetro del eje a  $79,957$  existiría el peligro, con la posible variación de lectura de  $I/2=\pm 5\mu\text{m}$  del instrumento, que se alcance la cota  $79,952$  que es menor que el mínimo valor aceptado y conduce al rechazo de la pieza.

Para evitarlo, la tolerancia dejada al operario se debe reducir entonces a  $36\mu\text{m}$  en lugar de los  $46\mu\text{m}$  prescritos, lo que corresponde a una reducción del 22 % aproximadamente.

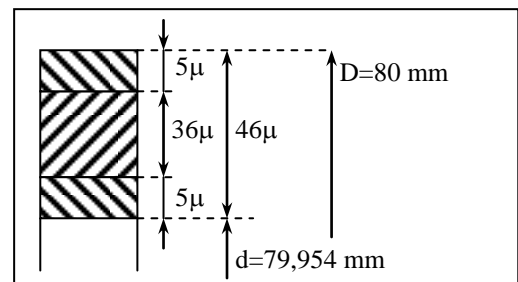


Figura 2

El problema para el operario que construye las piezas es ubicar las mismas entre el máximo y el mínimo, en forma algo similar al conductor de un camión que debe pasar su vehículo bajo una bóveda. Si en razón de la forma del pasadizo, el ancho efectivo se reduce en un 22 %, las probabilidades tropezar a derecha o a izquierda resultan seriamente aumentadas.

La regla de oro estima pues que es razonable cercenar la tolerancia en un 10 % (ello descartaría el instrumento utilizado, que le quita el 22 %). Sin embargo en algunos casos, cuando las tolerancias son muy estrechas, esto se hace difícil o imposible de cumplir debido a que el 10% es una cantidad muy pequeña. En estos casos se admiten relaciones tolerancia / incertidumbre menores. Por lo tanto el rango usual para la regla de oro es:

$$3 [ T/I ] [ 10 ]$$

**Regla de oro generalizada**

A medida que disminuye esta relación disminuye el costo del instrumento pero aumenta el rechazo de piezas que tal vez sean correctas, pues se hace mas pequeño el valor de  $T_c = T - I$ .

Un aparato más preciso entraña una doble erogación: de dinero en la compra y de meticolosas precauciones en el empleo, lo que aumentaría el precio de venta de la pieza.

En resumen, el instrumento económico tiene el riesgo de resultar caro en su empleo, mientras que el aparato preciso, elegido de acuerdo a la regla de oro, será rápidamente amortizado, reduciendo los retoques y los rechazos, disminuyendo la inquietud del operario y por ende su fatiga.

Se observa en la práctica que los procesos de producción de piezas mecánicas, que son objeto de controles de tipo estadístico, en la mayoría de los casos responden a distribuciones normales (Gaussianas), o sea simétricas y de baja dispersión. Los procesos que se alejan de este

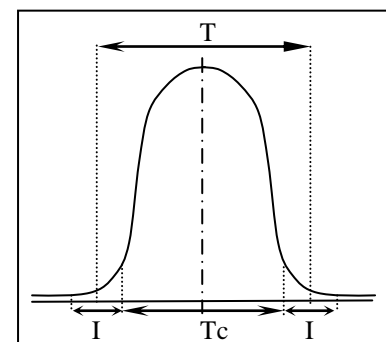


Figura 3

comportamiento, deberían ajustarse de manera que respondan a ese tipo de distribución por un lado, y por otro para que la mayoría de las piezas producidas se encuentren en tolerancia. La curva esquemática de Gauss (figura 3) representa la frecuencia de aparición de las medidas para una dada cota. Obsérvese que cierto número de piezas que están en tolerancia, son rechazadas debido a la restricción del instrumento. Pero ese número es pequeño, y desde luego es muy inferior al 10% del total de piezas producidas cuando  $T/I = 10$ .

Aunque resulta poco corriente, puede darse el caso en que la cantidad de piezas incorrectamente rechazadas se acerque al 10%. Sería el caso de un proceso cuya distribución de medidas es uniforme (todas las medidas dentro del rango de tolerancia tienen igual probabilidad de aparecer).

### Características de un instrumento de medición

**Incertidumbre:** es el intervalo entre los valores máximos y mínimos que puede dar la lectura del aparato que mide una magnitud real y constante.

**Precisión:** es la aptitud del instrumento para suministrar resultados con el mínimo error. Es lo contrario a incertidumbre.

**Fiabilidad (Repetitividad):** aptitud del instrumento para indicar la misma dimensión, cada vez que se repite una medida sobre la misma dimensión real y constante.

**Sensibilidad Absoluta (Amplificación):** es una de las características instrumentales más discutidas y que prestan a las más equivocadas interpretaciones. No son pocos, en efecto, los que a la idea de una mayor sensibilidad asocian (y a veces sustituyen) el concepto de una mayor precisión.

Un instrumento es sensible si permite ver grande una pequeña variación de magnitud, lo que constituye un mérito del dispositivo de amplificación y de conversión, tanto que un mismo instrumento, por ejemplo un comparador de tipo reloj, puede hacerse más sensible con solo prolongar el índice. El aumento de precisión es en tal caso, puramente ilusorio.

Antiguamente, la sensibilidad de un instrumento se definía como la más pequeña variación de la magnitud todavía perceptible, sin especificar cual fuere el consiguiente desplazamiento del índice. Esta definición se aplica actualmente al concepto de límite de percepción. Así se decía que un comparador era sensible al centésimo si se podía percibir el correspondiente valor  $\Delta M$  de la medida del instrumento:

$$s_a = \frac{\Delta l}{\Delta M} = \frac{\text{variación de la indicación}}{\text{Variación de la magnitud}}$$

$S_a$  puede ser variable o constante en todo el campo de medida. En el primer caso (que se verifica para escalas no lineales) es menester precisar el valor al cual se refiere. Por ejemplo, de un cierto voltímetro se dirá que tiene una sensibilidad absoluta de: 2 mm / mV a 20 mV; menor que la de otro más sensible:  $S_a = 3 \text{ mm} / 0,5 \text{ mV} = 6 \text{ mm/mV}$ . En otras palabras, los dos instrumentos hacen ver grande el mV, respectivamente 2 y 6 veces en el entorno de los 20 mV.

En Metrología Dimensional, frecuentemente la sensibilidad absoluta se traduce en mero factor de amplificación.

**Ejemplo:** en la escala de un comparador tipo reloj, los trazos de la misma se hallan espaciados en 1,5 mm, y a cada división de la escala (variación de la indicación) corresponde un desplazamiento del palpador de medida (variación de la magnitud) de 0,01 mm. La sensibilidad será pues:

$$S_a = 1,5 \text{ mm} / 0,01 \text{ mm} = 150 = \text{factor de amplificación}$$

Por ser ésta, a nuestro juicio, poco significativa, solo citaremos sin más comentarios la sensibilidad relativa cuyo valor es la relación entre  $\Delta l$  y la variación relativa  $\Delta M / M$  de la magnitud:

$$S_r = \frac{\Delta l}{\Delta M / M}$$

Resulta por consiguiente, homogénea con una longitud y se expresa en milímetros, centímetros, etc.

**Umbral de sensibilidad:** es el recíproco de la sensibilidad absoluta para  $\Delta l$  tendiendo a cero y representa la ineptitud del índice a moverse; en otras palabras, es el mínimo valor de la magnitud capaz de registrar el aparato. Un aparato será tanto mejor cuanto más pequeño es su umbral de sensibilidad (también llamado límite de percepción).

$$U_s = \lim_{\Delta L \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta L}$$

**Dispersión:** corresponde a los valores indicados por el aparato en mediciones repetidas de la misma magnitud y efectuadas en las mismas condiciones. Como aquellos no coinciden, se dice entonces que los resultados de la medición se dispersan.

**Aproximación:** es la menor fracción de una determinada magnitud lineal o angular que puede medirse con el instrumento.

**Campo de medida:** es el rango de valores que el instrumento puede medir.

## Unidades de medida

En los países adheridos al sistema métrico decimal, ahora adoptado internacionalmente, la unidad de medida es el metro. En la construcción de máquinas se emplea el mm y mediante la adopción del sistema de ajuste Internacional ISO, se ha introducido el micrón:

$$1 \mu\text{m} = 1 \text{ micrón} = 0,001 \text{ mm}$$

En los países de habla inglesa, aunque cada vez menos, todavía se emplea la pulgada:

$$1'' = 25,399959 \text{ mm (inglesa)}$$

$$1'' = 25,400005 \text{ mm (americana)}$$

La pulgada americana  $1'' = 25,4000$  exactos a  $20^\circ\text{C} = 68^\circ\text{F}$ , es el resultado de un trabajo de colaboración internacional y sobre esta cifra se han puesto de acuerdo Inglaterra y Estados Unidos con los países del sistema métrico. Esto permite que pueda transformarse la pulgada en milímetros sin la menor dificultad, lo que hace posible la intercambiabilidad. Como fracciones se emplean los submúltiplos:  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{8}$ ,  $\frac{1}{16}$ ,  $\frac{1}{32}$ ,  $\frac{1}{64}$ ,  $\frac{1}{128}$  de pulgada. Se utiliza además un sistema mixto consistente en la pulgada como unidad y como fracciones el décimo, el centésimo, el milésimo y el diezmilésimo de pulgada. Para tolerancias finas se emplea hasta el millonésimo.

## Causas de los errores e incertidumbres

Los errores e incertidumbres en una medida, pueden atribuirse a tres orígenes perfectamente distintivos:

- a) Los **errores del instrumento**: defectos constructivos, desgaste por el uso, deformaciones, aislamiento.
- b) Las **influencias físicas**: presión atmosférica, humedad, temperatura, y polvo.
- c) Los **errores personales**: agudeza visual, tacto, serenidad, salud e inteligencia.

a) **Errores del instrumento** (los instrumentos que aquí se citan, se describen más adelante)

a1) **Error de graduación**: depende del cuidado que se ha puesto en la construcción de la escala y eventualmente de su tarado si se trata de un aparato de medida por comparación.

Los defectos de exactitud en los aparatos graduados son las diferencias que presentan en relación a las dimensiones ideales. Para eliminar este error, bastaría conocer estas diferencias y compensarlas.

Supongamos que para medir una pieza se utiliza un micrómetro con un defecto de cero de  $+0,01$  mm (que no se ha corregido por resultar incómoda la corrección). Se puede eliminar este error de cero teniéndolo en cuenta al hacer la lectura. Por ejemplo, si la lectura directa es  $L_d = 35,17$ . La lectura compensada será:  $L_c = 35,17 - 0,01 = 35,16$ .

Este ejemplo ilustra sobre la forma de corregir los defectos de graduación siempre que sean conocidos.

También son errores de graduación las diferencias de exactitud que presentan los calibres de dimensiones fijas (bloques patrón, calibres de mandíbula, etc.). Cuando son conocidas tales diferencias, se graban directamente en el cuerpo del calibre.

a.2) **Defectos de paralaje**: habitualmente se imputa el error de paralaje al observador, pero no puede desconocerse la parte que concierne al instrumento en lo que respecta a su aptitud para reducirlo o magnificarlo.

Este defecto se reduce disponiendo a un mismo nivel la graduación y el índice de los micrómetros y pie de rey (figura 4); utilizando una lente de observación en ciertas máquinas de medir y agujas en forma de cuchillas en los instrumentos de cuadrante y aún completando con espejos para la reflexión de la aguja.

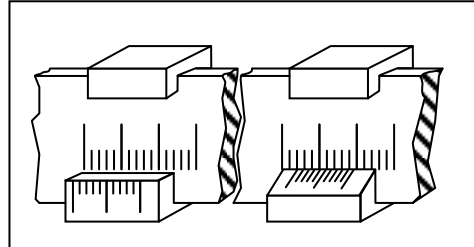


Figura 4

a.3) **Deformaciones elásticas**: en las medidas de contacto, que son las más frecuentes, la pieza sufre, bajo el efecto de una carga (presión de medición o presión de contacto) un aplanamiento general  $K_1$  y una deformación local  $K_2$  de la superficie de contacto. El aparato mismo sufre una deformación que no se tiene en cuenta si la presión es igual en el tarado y durante las mediciones.

a.3.1) **Aplanamiento general**: la presión de medición es en general de 250 a 300 gramos pero excepcionalmente puede llegar al valor de 1 kilogramo o descender a valores de 100 e incluso, 50 gramos.

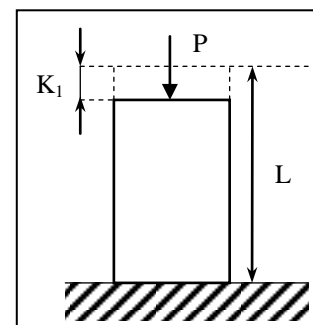


Figura 5

La deformación elástica resultante (muy pequeña) es proporcional a la carga  $P$ , a la longitud de la pieza  $L$  e inversamente proporcional a la sección  $S$  y al módulo elástico  $E$  (figura 5). Ejemplo: para un bloque patrón con  $L = 200$  mm,  $S = 10 \times 30$  mm<sup>2</sup>,  $P = 0,3$  Kg y  $E = 22.000$  kg/mm<sup>2</sup>, el aplastamiento  $K_1$  es:



$$K1 = \frac{L \cdot P}{S \cdot E} = 0.00001 \text{ mm}$$

Valor despreciable en la mayoría de los casos.

**a.3.2) Deformación local:** (figura 6) tiene siempre más importancia que el efecto anterior y es muy variable según sea la naturaleza del contacto: plano, lineal o puntual (figuras 7, 8 y 9) y también según sea el estado de las superficies. En estas microdeformaciones no son aplicables las fórmulas clásicas, primero porque la carga aplicada es muy pequeña y además por la importancia que asume la deformación elástica de las crestas (rugosidad superficial) que depende mucho del estado de las superficies.

Sin embargo, en las fórmulas empíricas utilizadas no está contemplada la rugosidad superficial, tomándose solo en cuenta la presión de medición, valor y tipo de curvatura.

**a.3.2.1) Contacto plano** (figura 7): depende en gran medida del estado de la superficie

**a.3.2.2) Contacto lineal** (figura 8): la deformación local  $K2$  para calibres machos cilíndricos o alambres cilíndricos de medición, obedece sensiblemente a la fórmula empírica:

$$K2 = 0.00092 \frac{P}{L} \sqrt[3]{\frac{1}{D}}$$

Donde  $P$  = carga en kg,  $D$  = diámetro en mm,  $L$  = longitud de contacto en mm.

**a.3.2.3) Contacto puntual** (figura 9): la deformación es mas importante todavía y corresponde a casos como: palpadores esféricos, alambres cilíndricos de medición en contacto puntual con los flancos de la rosca de un calibre macho para roscas, punta de contacto de un micrómetro de interiores, etc. La deformación local  $K2$  obedece sensiblemente a la fórmula empírica:

$$K2 = 0.0014 \sqrt[3]{\frac{P^2}{r}}$$

Donde:  $P$  = presión de medición en kg;  
 $r$  = radio de curvatura del contacto en mm.

El aplastamiento total es  $K = K1 + K2$  en mm.

Nota: en la medición de roscas mediante alambres calibrados, la deformación local de los alambres varía en función inversa de los diámetros, desde  $2 \mu\text{m}$  para una rosca de  $\phi=20$  a  $\approx 0.8 \mu\text{m}$  para los de  $\phi = 50\text{mm}$ ; esto se desprende de la fórmula  $K2$  en donde  $r$  crece con el diámetro de la rosca.

**a.3.3) Flexión – torsión:** la deformación puede ser considerable bajo esfuerzos de flexión y torsión, debido, a menudo, al propio peso de la pieza que se mide o del elemento de medición. Así se comprueba una flecha elástica sobre ejes largos e incluso sobre reglas de taller (figura 10). La figura 10a, muestra la deformación de una regla sobre una superficie cóncava y la figura 10b, sobre una superficie convexa. A pesar de la rigidez que le proporcionan los nervios, se producen flechas de 0.02 a 0.05 mm en reglas de 1.5 a 2 metros.

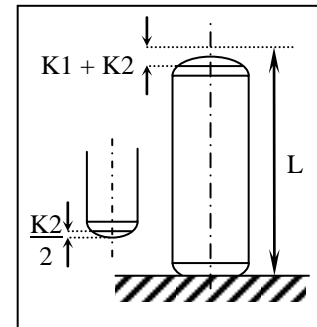


Figura 6

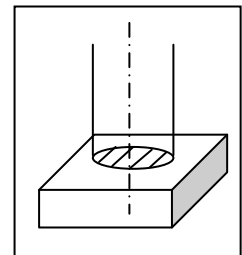


Figura 7

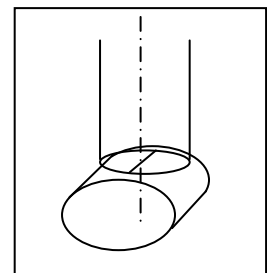


Figura 8

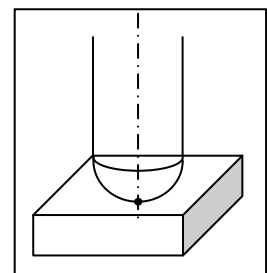


Figura 9

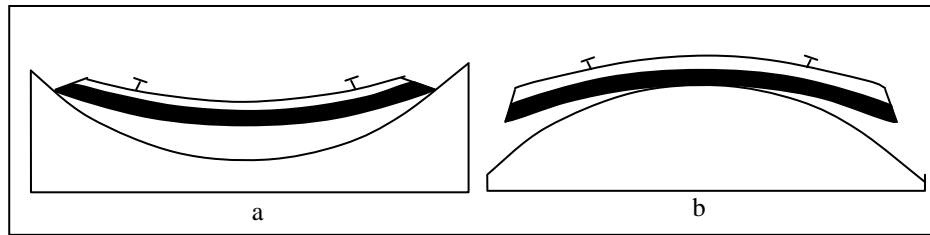


Figura 10

Los nervios de refuerzo tampoco otorgan la rigidez necesaria a los mármoles ordinarios de taller (planos de referencia) de dimensiones superiores a 600 x 400, se tuercen según la posición de los apoyos bajo su propio peso y bajo la acción de las cargas que soportan.

Otro ejemplo de flexión en instrumentos de medida es la apertura elástica de los micrómetros. Esta flexión del arco está originada en la presión de medición de los micrómetros de tamaño corriente y en su propio peso en los de grandes dimensiones.

**a.4) Deformaciones permanentes:** Pueden tener diversos orígenes:

**a.4.1) Desgaste:** Donde mayor importancia adquiere este problema es en los calibres fijos de diversos tipos, por razones obvias, su consideración se encara de diversas formas. En la fabricación de los calibres fijos para ejes y agujeros, se deja un margen disponible hasta el llamado límite de desgaste.

En el empleo de los citados calibres y para evitar rechazos de piezas que están dentro de los límites de validez, se recomienda que los calibres más desgastados (dentro de lo admisible) sean utilizados para controlar las piezas rechazadas en el control inicial, y en cambio los operarios fabriquen sus piezas de acuerdo a los calibres más nuevos.

En otros instrumentos, el desgaste afecta tanto a sus superficies de contacto como también a sus elementos de guiado, centrado y otros mecanismos.

**a.4.2) Envejecimiento:** algunos materiales utilizados en la fabricación de instrumentos de medida, sufren cambios estructurales que se completan con el transcurso del tiempo (meses y aún años) yendo acompañados de variaciones de volumen que, aunque pequeñas, pueden ser importantes para ciertos grados de precisión. Esto ocurre en la fabricación de mármoles con la fundición de hierro y con los aceros templados en la confección de calibres y bloques patrón. En ambos casos, las piezas deben someterse, antes de darles sus dimensiones finales, a tratamientos estabilizantes o de envejecimiento y a los cuales nos referiremos oportunamente.

**a.5) Defectos y holguras de articulación:** los juegos que ocasionan irregularidades de la lectura, se compensan con resortes, siempre que sea posible. Por ejemplo, en los comparadores de tipo reloj, un resorte espiral actúa sobre el piñón que lleva la aguja, eliminando los inevitables juegos de engrane.

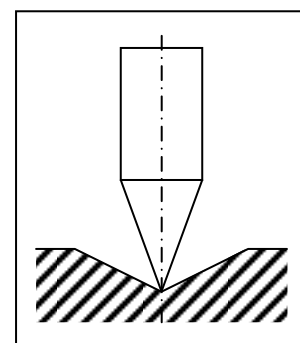


Figura 11

En los acoplamientos cuya amplitud de giro es pequeña, para evitar holguras se emplean cuchillas (figura 11) con ventajas sobre los pivotes esféricos (figura 12).

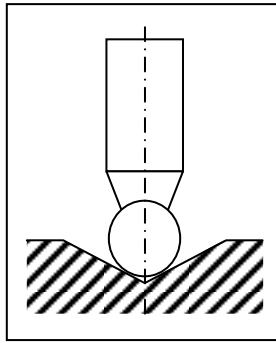


Figura 12

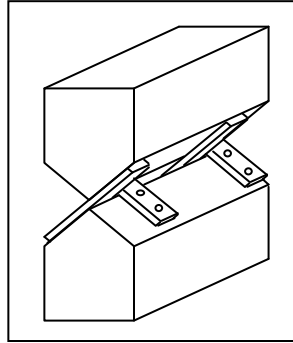


Figura 13a

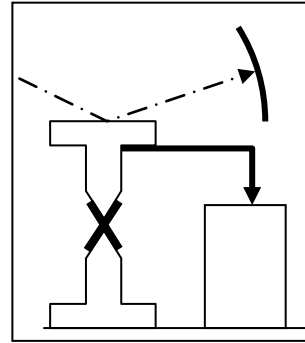


Figura 13b

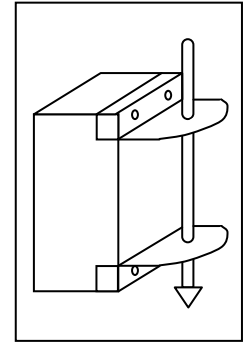


Figura 14

La figura 13a muestra un dispositivo de pivote sin holguras, construido por láminas de resorte muy delgadas, puestas en cruz. En la figura 13b aparece su aplicación para un comparador óptico. La figura 14, presenta un paralelogramo flexible que a menudo sustituye al sistema de patín y guía cuando la carrera total no pasa de 2 a 3 mm.

**a.6) Defectos de rectitud y de forma:** son más importantes en los siguientes aparatos, en los que puede amplificar un defecto primario.

**a.6.1) Micrómetro:** defectos en el tornillo, falta de paralelismo en las puntas de contacto (resulta en un defecto periódico, ver figura 15).

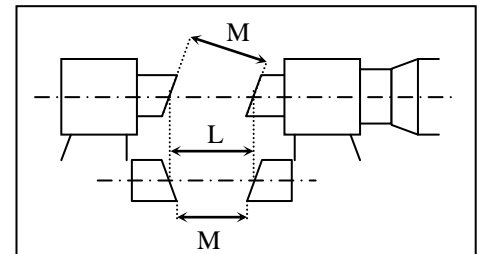


Figura 15

Si llamamos  $M$  a la medida que está realizando el instrumento, y  $L$  a la medida a la cual corresponde la lectura de no mediar el defecto apuntado, debiera ser  $M = L$ , pero para ambas posiciones de los contactos en la figura 15,  $L$  es mayor que  $M$ .

**a.6.2) Pie de rey:** mordazas no paralelas (torcidas o con juego) figura 16. Allí tenemos  $M = L$ ;  $M1 > L1$ ;  $M2 \approx L2$

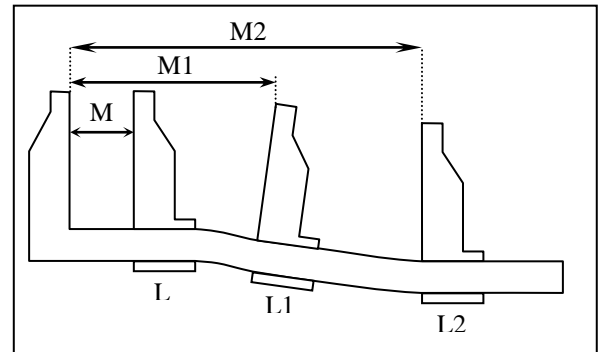


Figura 16

**a.6.3) Comparadores tipo reloj:** defectos en el paso y en la concentricidad de los piñones. Ejemplo (figura 17): en un engranaje de 50 mm de diámetro y cuya excentricidad  $OO'$  es de 0.1 mm se tiene que  $\alpha = 6.87$  minutos, entonces hay 13.75 minutos de diferencia para recorrer el sector  $AB$  en sentido horario con respecto al sentido antihorario.

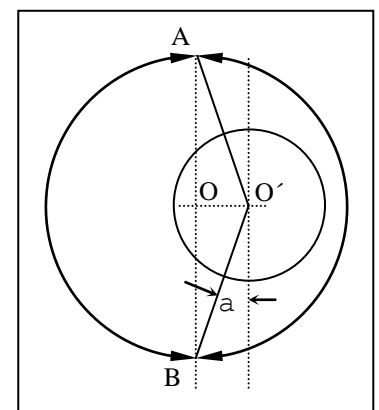


Figura 17

**a.6.4) Goniómetro:** defecto de excentricidad. Ejemplo: para un diámetro de 50 mm una excentricidad de 0.004 mm representa un error angular de 1 minuto.

### b) Errores por influencias físicas:

En las mediciones industriales, la humedad y la presión ambiente tienen una influencia que puede despreciarse aún en casos extremos como es la utilización de comparadores neumáticos.

El polvo influye cuando la falta de limpieza permite su interposición entre las superficies de contacto, falseando las medidas. Es menester destacar además, que el lugar destinado a las mediciones debe

tener un ambiente totalmente exento de polvo a fin de preservar del desgaste los delicados instrumentos de medición.

Entre los factores ambientales, la temperatura asume primordial importancia en la medición técnica de los productos de precisión. Las principales fuentes de perturbación térmica, capaces de influir en mayor o menor grado sobre la temperatura del instrumental de medida y de la pieza son: calor debido a la iluminación artificial, a las radiaciones solares, a la calefacción y al cuerpo del que realiza la medición. Entre todas, la última es la más difícil de prevenir y de controlar, debido a que todavía en muchos procesos es difícil evitar la presencia humana y el manipuleo de las piezas e instrumentos. Para tolerancias pequeñas se recomienda proveer a los instrumentos de medición de empuñaduras aislantes como así también el empleo de guantes para evitar el calor de la mano.

En algunos casos, la necesidad de un control de las piezas sobre la máquina-herramienta misma, obliga a considerar el calentamiento producto del mecanizado que puede alcanzar importantes niveles de temperatura.

Con el objeto de unificar criterios, se ha fijado una temperatura de referencia internacional de 20 °C y que las cotas de la pieza indicadas en los planos son las correspondientes a esa temperatura.

Si  $L_t$  = longitud de un sólido a temperatura  $t$  °C;  
 $L_0$  = longitud del mismo sólido a 0 °C,  
 $\alpha$  = coeficiente de dilatación térmica del sólido;  
 $\Delta t$  = aumento de temperatura, se tendrá que:

$$L_t = L_0 + L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta t \quad (1)$$

Si llamamos a  $L_t - L_0 = \Delta$  = incremento en la longitud: y  $\Delta = L_0 \cdot \Delta t \cdot \alpha$  para  $t = 1$  °C resultará:

$$\alpha = \frac{\Delta}{L_0} = \frac{\text{alargamiento del sólido para } 1 \text{ } ^\circ\text{C}}{\text{longitud del sólido a } 0 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

este coeficiente depende del material considerado y vale:

Material	$\alpha$
Acero al carbono	$11,5 \times 10^{-6}$
Cobre	$17 \times 10^{-6}$
Aluminio	$23 \times 10^{-6}$

De la fórmula (1):  $L_t = L_0 (1 + \alpha \cdot \Delta t)$

De donde:  $L_0 = \frac{L_t}{(1 + \alpha \cdot \Delta t)}$

Estas ecuaciones nos permiten resolver problemas como los siguientes:

1. La longitud de un eje de acero es a 0 °C de 500 mm. ¿Cuál será su longitud a 20 °C?

Recordemos que para el acero:  $\alpha = 11,5 \times 10^{-6}$

$$L_{20} = L_t = 500 \cdot (1 + 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot 20) = 500,115 \text{ mm}$$

2. La longitud de un eje de acero a 20°C es de 500,115 mm. ¿Cuál será su longitud a cero grado centígrado ?

$$L_o = \frac{500 \times 115}{(1 + 11,5 \times 10^{-6} \times 20)} = 500 \text{ mm}$$

Este modo de calcular los incrementos de longitud sobre  $L_o$  no resulta aplicable a la práctica industrial dado que en la mayoría de los casos,  $L_o$  es un valor desconocido. Se puede utilizar, en reemplazo, uno de los valores conocidos (el que convenga en cada caso)  $L_t$ ,  $L_{20}$  y mas ordinariamente  $L_{leida}$ . Esta sustitución introduce en el resultado un error secundario prácticamente despreciable y siempre inferior a las inexactitudes debidas a los coeficientes de dilatación.

Para demostrarlo, volvamos al ejemplo anterior.

De  $L_{20} = L_o + L_o \cdot 20 \cdot \alpha$  y sustituyendo en el 2º miembro el término  $L_o$  por  $L_{20}$ , se tiene:

$$L_o = L_{20} (1 - 20 \cdot \alpha) = 499,99997355 \text{ mm}$$

En lugar del resultado exacto de 500, o sea un error secundario de 0,02645  $\mu\text{m}$  de magnitud insignificante. Acotemos que se ha calculado  $L_o$  como un  $L_t$  cualquiera, utilizando el valor de  $L_{20}$ .

### Variación del juego o del aprieto con la temperatura

El proyectista debe conocer las relaciones que vinculan entre sí a los ajustes entre piezas acopladas, tanto a la temperatura de referencia (20°C) como a la cual está previsto su funcionamiento.

Consideremos un ajuste con juego donde las piezas macho y hembra acopladas tienen temperaturas cualesquiera y son de materiales distintos.

Llamamos:

- $L_h$  = medida de la pieza hembra a temperatura  $t_h$
- $L_m$  = medida de la pieza macho a temperatura  $t_m$
- $L_{h20}$  = medida de la pieza hembra a 20 °C
- $L_{m20}$  = medida de la pieza macho a 20 °C

$$J_{20} = L_{h20} - L_{m20} = \text{juego a } 20 \text{ °C}$$

$J = L_h - L_m$  = juego resultante a  $t_h$  y  $t_m$  respectivamente. De acuerdo al párrafo anterior, podemos escribir:

$$L_h = L_{h20} + L_{h20} \cdot \alpha_h (t_h - 20)$$

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

Restando las ecuaciones resulta:

$$L_h - L_m = J = J_{20} + \Delta h - \Delta m$$

En donde  $\Delta h$  y  $\Delta m$  son respectivamente los incrementos de las piezas macho y hembra con los signos de los valores  $t_h$  y  $t_m$  frente a 20 °C.

Si el ajuste es “forzado”, existirá un aprieto resultante, cuyo valor será:

$$A = L_m - L_h = A_{20} + \Delta m - \Delta h$$

## Corrección de las medidas

En la medición con instrumentos de escala (similares al pie de rey o al micrómetro), llamando  $t_c$  a la temperatura del instrumento se tiene que:

- La lectura es por defecto cuando  $t_c$  es mayor a  $20\text{ }^\circ\text{C}$  (figura 18a).
- La lectura es por exceso, cuando  $t_c$  es menor a  $20\text{ }^\circ\text{C}$ .

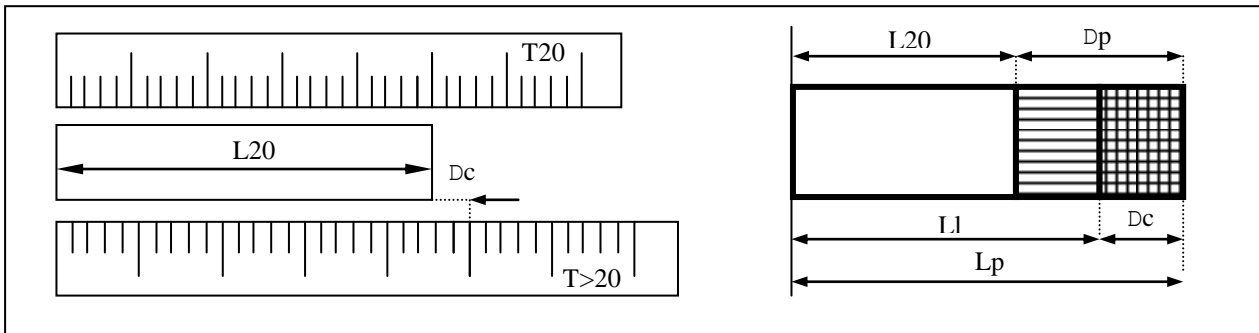


Figura 18 a

Figura 18 b

Consideramos el problema en su aspecto mas general, es decir, herramientas de medida y pieza, de diferentes materiales y a temperaturas distintas.

Llamamos (figura 18b):

- $t_p$  = temperatura de la pieza
- $t_c$  = temperatura del instrumento
- $L_p$  = longitud de la pieza a  $t_p$
- $L_1$  = longitud de la pieza leída en el instrumento
- $L_{20}$  = longitud real de la pieza a  $20\text{ }^\circ\text{C}$
- $\alpha_p$  = coeficiente de dilatación de la pieza
- $\alpha_c$  = coeficiente de dilatación del instrumento
- $\Delta_p$  = incremento de la pieza a  $t_p$
- $\Delta_c$  = incremento del instrumento a  $t_c$

De la figura 18b surge que:  $L_p = L_{20} + \Delta_p$     y     $L_1 = L_p + \Delta_c$

Eliminando  $L_p$  se tiene:

$$L_{20} = L_1 - \Delta_p + \Delta_c$$

$\Delta_p$  y  $\Delta_c$  son los incrementos positivos para temperaturas superiores a  $20\text{ }^\circ\text{C}$  y negativos para temperaturas inferiores a  $20\text{ }^\circ\text{C}$ . Sus valores respectivos son:

$$\Delta_p = L_{20} \cdot \alpha_p (t_p - 20) \qquad \Delta_c = L_{20} \cdot \alpha_c (t_c - 20)$$

los problemas que se plantean son: hallar  $L_{20}$ ,  $L_p$  ó  $L_1$  conociendo una de ellas.

**Problema:** se mide una pieza de aluminio (temperatura  $40\text{ }^\circ\text{C}$ ) con un micrómetro (acero, temp.  $30\text{ }^\circ\text{C}$ ). La longitud aparente de la pieza es entonces  $250,35\text{ mm}$ . ¿Cuál será la longitud real a  $20\text{ }^\circ\text{C}$ .

Datos:             $L_1 = 250,35$      $\alpha_p = 23 \cdot 10^{-6}$      $\alpha_c = 11,5 \cdot 10^{-6}$      $t_p = 40\text{ }^\circ\text{C}$      $t_c = 30\text{ }^\circ\text{C}$   
 Incógnita:       $L_{20}$

$$L_{20} = L_1 + L_o \cdot \alpha_c (t_c - 20) - L_o \cdot \alpha_p (t_p - 20)$$

Sustituyendo  $L_o$  por  $L_1$  que es conocida:

$$L_{20} = L_1 [1 + \alpha_c (t_c - 20) - \alpha_p (t_p - 20)] = 250,26 \text{ mm}$$

El problema inverso al anterior o sea, cuanto debe leerse en un instrumento a  $t_c$  sobre una pieza a  $t_p$  para obtener el valor acotado en el plano, se resuelve despejando de la ecuación recién usada, el valor correspondiente de  $L_p$ . Dicha ecuación nos permite, con las simplificaciones necesarias, ubicarnos en los casos particulares siguientes, se comprueba que en la medida realizada a  $20^\circ\text{C}$ ,  $t_p = t_c = 20^\circ\text{C}$ , arroja un error nulo y  $L_1 = L_{20}$ . Igualmente, si la pieza y el calibre son del mismo material (caso corriente al medir piezas de material ferroso) y  $t_c = t_p$ , como  $\alpha_p = \alpha_c$  resulta  $\Delta_p = \Delta_c$  por lo que  $L_1 = L_{20}$ .

Esta conclusión nos revela que al medir ferrosos (aceros o fundición), puesto que en los instrumentos de medición las partes capaces de producir errores por temperatura se fabrican de acero a fin de no hacer correcciones, es suficiente con dejar a la pieza y al instrumento el tiempo necesario para igualar la temperatura del ambiente en que se halla.

**Problema:** Entre qué límites se debe construir una pieza de aluminio a  $30^\circ\text{C}$  medida con un micrómetro a la misma temperatura, siendo la cota del plano 100 H5 que la norma ISO especifica con las siguientes medidas límites a  $20^\circ\text{C}$ : 100 y 100,015 mm. (tolerancia = 0,015 mm)

$$L_{20} = L_1 + \Delta_p - \Delta_c = L_{20} - L_o \cdot \alpha_c (t_c - 20) + L_o \cdot \alpha_p (t_p - 20)$$

$$t_p - 20 = t_c - 20 = 10^\circ\text{C} \quad \text{y reemplazando } L_o \text{ por } L_{20}$$

$$L_1 = 100,012 \text{ mm}$$

Para calcular el límite superior, es suficiente adicionar la tolerancia, resultando finalmente que los valores límites a  $30^\circ\text{C}$  serán: 100,012 y 100,027 mm.

De lo que antecede se desprende la ventaja de usar en la construcción de herramientas de medida, materiales con coeficientes de dilatación igual al del acero al carbono, contra la engañosa tentación de emplear aleaciones de bajo coeficiente de dilatación. Conforme se incrementa el porcentaje de níquel en el acero, disminuye el coeficiente de dilatación hasta alcanzar, para el 36 %, el valor de  $1 \times 10^{-6}$ . Esta aleación se conoce por el nombre de INVAR y fue obtenida por el doctor Guillaume. Su empleo está reservado generalmente para construcción de cintas para medidas geodésicas. Se la reconoce como dimensionalmente inestable en el tiempo, teniendo en ese aspecto mejores cualidades la aleación que el mismo Guillaume realizó y que tiene un 42 % de níquel pero con un coeficiente de  $8 \times 10^{-6}$  por  $^\circ\text{C}$ . Para la fabricación de reglas patrones se prefiere la aleación de 58 % de níquel que tiene la doble ventaja de resistir a la corrosión y tener un coeficiente de dilatación igual al del acero.

Nota: La medición de temperaturas en las piezas se verifica mediante termómetros provistos con ese fin. Poseen buena capacidad de conducción del calor a cuyo fin el bulbo lleva una cubierta de plata, convexa de un lado y plana del otro. Permiten estimar el décimo de grado y tienen un rango de  $14^\circ\text{C}$  a  $26^\circ\text{C}$ . Para hacer las determinaciones se coloca el bulbo sobre la pieza y se recubre con cera.

### c) Errores de medición personales

Los errores de medición personales son naturalmente inevitables pero pueden disminuirse mediante la práctica. Se trata de errores subjetivos que se deben a defectos de agudeza visual, del tacto o de la sensibilidad pero que, en la mayoría de los casos, son imputables al cansancio del operador o a una práctica insuficiente.

**c.1) Error de lectura:** Son los que comete el operador al leer la dimensión sobre la graduación del aparato.

**Poder separador:** el ojo no puede leer fácilmente graduaciones cuyos trazos estén muy próximos, puesto que su poder separador está prácticamente limitado a distancias de 0,1 mm. Se remedia esta limitación del ojo humano utilizando aparatos de gran amplificación, generalmente ópticos, lupa (2 a 5 aumentos) o microscopio (10 a 80).

**Paralaje:** es el error de lectura producido cuando el operador no mira el índice según la dirección perpendicular a la escala o graduación.

**c.2) Tacto:** Ninguna medición debe realizarse con marcado esfuerzo. Cuanto mayor es la fuerza empleada en sostener un micrómetro, pie de rey, calibre, etc., tanto menor es la sensibilidad táctil en el proceso de medición. Por eso, es recomendable aligerar las herramientas de medir dentro de los límites de rigidez exigidos.

No debe olvidarse que la acción de poner en contacto las herramientas de medir con la pieza, puede dar lugar a errores. Según que tal acción se efectúe con mayor o menor esfuerzo, se producirá una presión de medición de valor distinto que originará deformaciones elásticas. Esta variación de la forma da lugar a lecturas mas o menos erróneas. Para atenuar ésta incertidumbre, algunos instrumentos llevan dispositivos que fijan un valor constante para esta presión, pudiendo servir como ejemplo el trinquete del micrómetro.

En todos los procesos de medición, el calibre o la pieza deben sostenerse perpendicular o paralelamente a una superficie dada y en esta posición introducirse o pasarse sobre la pieza. Si no se han previsto superficies de orientación o de introducción, conicidades de entrada o una operación de centrado previo, la agudeza visual y el tacto han de jugar un papel especial.

**c.3) Inercia de las partes móviles desplazadas a velocidad variable:** este error se manifiesta cuando, como consecuencia de haber dejado avanzar la pieza móvil de contacto (generalmente palpador o pata de medición del instrumento) con excesiva rapidez, la separación de ambas piezas de contacto sufre los efectos de inercia de los elementos desplazados. En general, esto provoca lecturas por defecto sobre piezas macho y por exceso en las piezas hembras. Un ejemplo típico de este defecto lo presenta el micrómetro al deformarse elásticamente su arco (armadura) cuando se supera la presión de medición recomendada.

**c.4) Defectos de posición:** se presentan cuando la referencia para la ubicación de un instrumento es vaga o si las referencias son varias y a la vez contradictorias (medición de interiores con micrómetro) lo que debe ser compensado con una gran habilidad personal. También puede ser el resultado de una técnica deficiente (medición de exteriores con micrómetro).

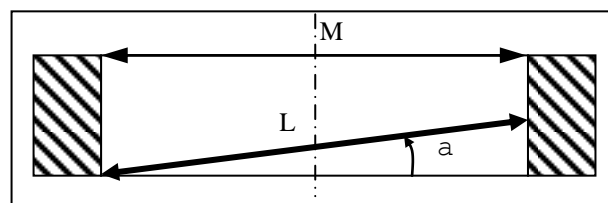


Figura 19

**c4.i) Medida interior no perpendicular al eje (figura 19):**

Si  $L$  = lectura del instrumento (medición incorrecta)

$M$  = medida correcta

$\alpha$  = inclinación del instrumento con respecto a la normal al eje de la pieza.

$$M = L \cdot \cos \alpha \quad \text{Para } L = 100 \text{ mm} \quad \text{y} \quad \alpha = 1^\circ \quad \text{será} \quad M = 99,985 \text{ mm}$$



**c4.ii) Medida exterior no normal al eje (figura 20)**

De la figura sacamos:

$$L = \frac{M}{\cos \alpha} + T \cdot \operatorname{Tg}(\alpha)$$

de donde

$$M = L \cdot \cos \alpha - T \cdot \operatorname{sen} \alpha$$

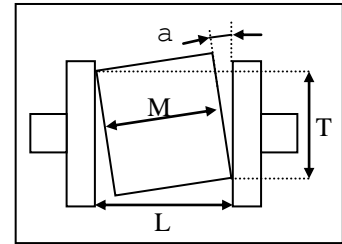


Figura 20

Para  $L = 100 \text{ mm}$      $\alpha = 1^\circ$     y     $T = 10 \text{ mm}$     resulta     $M = 99,810 \text{ mm}$

**c4.iii) Medida interior no diametral (figura 21):**

$$M = \frac{L}{\operatorname{Cos}(\alpha)} \quad \text{para} \quad \cos \alpha = 1^\circ \quad L = 100 \text{ mm}$$

Resulta     $M = 100,015 \text{ mm}$

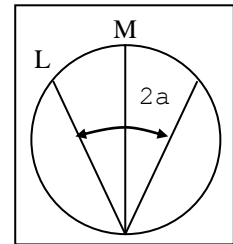


Figura 21

Es menester citar aquí los errores cometidos por descuidos, como por ejemplo tomar erróneamente las cifras enteras debido a que, en las medidas de gran precisión, el operador se concentra totalmente en las centésimas y las milésimas de mm. Las medidas consideradas importantes deben repetirse y de ser posible con diferentes elementos de medición. La comparación resultante es la mejor manera de evitar este tipo de errores.

**Bibliografía**

- D. Lucchesi, “Metrotecnica, tolerancias e instrumentación”, editorial labor S.A
- J. A. Rodríguez, “Metrología”, CETILP.
- Martínez de San Vicente, “Metrología mecánica”, UNR.
- Francis T. Farago, “Handbook of Dimensional Measurement”, Industrial Press Inc.
- Mitutoyo, “Catalog number E70”, Mitutoyo Corporation
- Mitutoyo, “Catalog number E80”, Mitutoyo Corporation