

## Selección de instrumentos

La tarea de control final o parcial (durante la producción) de las medidas de las cotas de una pieza (o lote de piezas) implica determinar anticipadamente el instrumento y el método más adecuado, que arribe a resultados con el menor error, tiempo y costo del proceso de medición.

Como ejemplo, la Figura 1 muestra el plano simplificado de una pieza a controlar, donde pueden verse todas las superficies interiores y exteriores, los valores nominales y tolerancia correspondientes a cada cota. En este caso la tolerancia de fabricación dimensional ( $T = 0,2$  o  $\pm 0,1$  mm) es general para todas las cotas lineales, tales como los diámetros y ranuras de interiores y exteriores, profundidad de agujeros, ranuras, etc. Por separado deberán indicarse la tolerancia del ángulo del cono y la rosca. Debe notarse que para el agujero de diámetro 22 mm se especificó una tolerancia de circularidad de 0,02 mm. (definición, en el tema Medición de ejes y agujeros, Defectos).

La mayor parte de las medidas podrán efectuarse con un único instrumento de lectura directa, mientras que por ejemplo, para la cota que indica la distancia del centro del agujero lateral a la superficie A, deberá utilizarse un método e instrumentos diferentes (el eje del agujero es un elemento abstracto). Por su parte el relevamiento de circularidad también se hará con el método apropiado. Estas diferencias y otras obligan a tener en cuenta todos los factores que influyen en el proceso de medición para la selección del instrumento y métodos de medición.

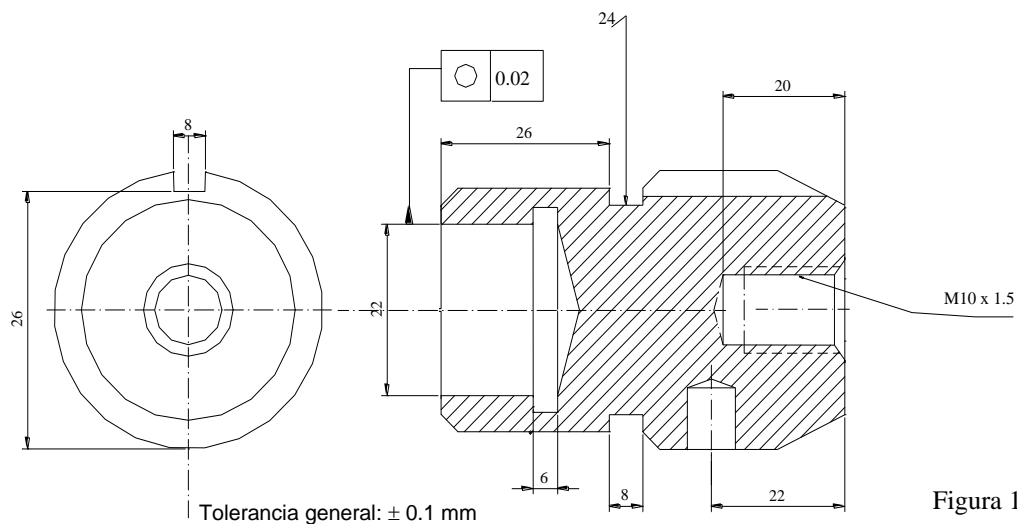


Figura 1

### Factores que influyen en la selección del instrumento y el método de medición

Se analizan la influencia de la pieza misma (sus características), condiciones físicas y características del instrumento.

**Tipo de cota:** Determina el tipo de instrumento dependiendo si la cota es exterior o interior, ranuras, formas especiales (roscas, dentados), defectos de forma y posición, distancia entre ejes o agujeros, etc.

**Acceso a la cota:** Considera la dificultad (o la imposibilidad según el tipo de instrumento) de acceder con los contactos del instrumento a las superficies, tal que se asegure el correcto posicionamiento del mismo. Por ej: Interiores profundos, etc.

**Sistema de referencia:** La acotación indicada en el plano, define un plano, eje o punto de referencia, a tener en cuenta para efectuar la medida. Asimismo el tipo de acotación (absoluta o incremental).

**Tamaño de la cota.** Determina el campo de medida del instrumento. En piezas grandes, aumentan las dificultades para establecer la posición correcta de la pieza y del instrumento y en general el error de medición, siendo necesario el uso de montajes portapiezas o soporte de instrumentos, etc.

**Ambiente:** Se analiza la influencia de las condiciones físicas (temperatura, polvo, etc.) sobre el valor de lectura, partiendo del espacio físico, si se trata de un laboratorio, taller, etc

**Tamaño del Lote:** Estudio de método (Tiempo). En producciones en serie, podrán reemplazarse los instrumentos de medición por calibres de tolerancia fijos (pasa-no pasa, no se obtiene el valor de la medida) o mediciones indirectas por comparación (se determina la discrepancia respecto de la medida de un patrón).

**Tolerancia de la cota:** En base a la misma, se determina el error máximo admisible de medición, teniendo en cuenta el instrumento, accesorios y el método de medición a utilizar.

### Aplicación de la Regla de Oro de la Metrología

Para la selección del instrumento nos basaremos en la **Regla de Oro de la Metrología**: “**La incertidumbre del instrumento (I) debe ser menor o igual al 10% de la tolerancia (T) de la cota que se mide**”. (Se descartan en este análisis el resto de los factores.)

$$I \leq 0,1 T$$

La Tolerancia de Fabricación se fija como la máxima diferencia admisible en las cotas de las piezas.

Por lo tanto **T**: Tolerancia dimensional de la cota, se expresa como:

$$T = M_{\text{máx}} - M_{\text{mín}}$$

Donde:

**M<sub>máx</sub>**: Medida máxima admisible de la cota.

**M<sub>mín</sub>**: Medida mínima admisible de la cota. (figura2)

El valor nominal de la cota (M) está comprendido en el intervalo (M<sub>máx</sub> - M<sub>mín</sub>), incluyendo los extremos.

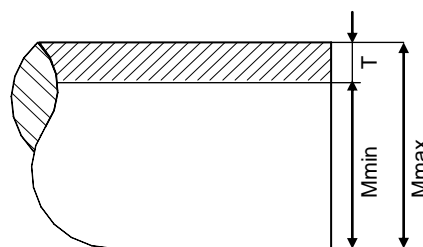


Figura 2

En la práctica de control de piezas, dados el método y condiciones físicas (temperatura, etc) adecuadas y un operador adiestrado, se adopta como la medida de la cota, el valor de lectura obtenido (L) y el error asociado a la medición es la incertidumbre del instrumento I, obtenida de la certificación de un ente de calibración habilitado. Por lo tanto, el valor de la cota medido se presenta como:

$$L \pm \frac{I}{2}$$

NOTA: Será conveniente la repetición de lecturas (normalmente menos de 10) hasta verificar la aptitud del método y del instrumento, entonces el valor de L representa el valor medio de las lecturas.

El Valor verdadero de la cota (L verdadero) se desconoce, solo puede asegurarse que se encuentra comprendido en el intervalo de valores  $L+I/2$  y  $L-I/2$ . Y lo expresamos como:

$$L_{\text{verdadero}} = L \pm I/2$$

siendo L : **Valor leído**

El fabricante certifica su instrumento con una incertidumbre (precisión)  $\pm I/2$

**Incertidumbre (Precisión o Accuracy) :  $\pm I/2 \mu\text{m}$**

Ese dato puede presentarse en distintos formatos:

1- Con un valor constante en micrones. Por ejemplo:  $I = \pm 20 \mu\text{m}$

2- Más comúnmente, y como ejemplo:  $I = \pm (2 + L/75) \mu\text{m}$

Donde: L: Longitud que se mide, en milímetros.

Los valores 2 y 75 son valores característicos para un instrumento dado. Serán diferentes para los distintos instrumentos.

### Cálculo de la Tolerancia corregida

Cuando el valor leído (L) es cercano a las medidas límites admisibles  $M_{\text{máx}}$  y  $M_{\text{mín}}$  para la cota, el valor verdadero podría estar fuera de tolerancia, ( $> M_{\text{máx}}$  o  $< M_{\text{mín}}$ ) (Ver Figura 3 ).

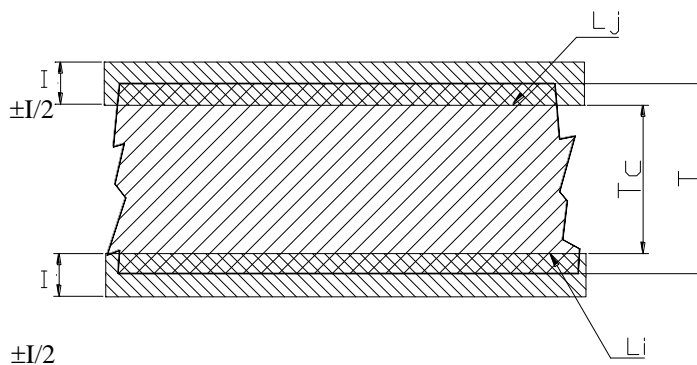


Figura 3

Podremos asegurar que las piezas se encuentran en medida (dentro de la tolerancia) solo cuando:

$$L \leq M_{\text{máx}} - I/2 \quad L \geq M_{\text{mín}} + I/2$$

Se descartan todas las piezas cuyas lecturas se encuentran dentro de la franja de incertidumbre.

De la Figura 3, surge que  $L_i$  y  $L_j$  son los nuevos límites admisibles de lectura, cuando la medición se efectúa con un instrumento de incertidumbre  $\pm I/2$ , sobre una cota cuya tolerancia es T.

Por lo tanto, como se vió, la tolerancia corregida por la incertidumbre del instrumento,  $T_c$ , queda definida como:

$$T_c = T - I$$

Conclusión: En el control de piezas la tolerancia de la cota se reduce en un valor igual a la incertidumbre I del instrumento de medición.

Expresando la incertidumbre del instrumento y la tolerancia de la pieza como:

$$I = \pm I/2 \quad \text{y} \quad T = \pm T/2$$

Queda:

$$T_c = \pm ( T/2 - I/2)$$

La regla de oro se aplica a la fabricación de piezas mecánicas en general. En producción de piezas de precisión (tolerancia pequeña), la aplicación de ésta última regla implicaría el uso de instrumentos muy difíciles de obtener, en el mercado tradicional. Como ejemplo, para  $T = \pm 0,01 \text{ mm}$

$$I \leq 0,1 T \quad \Rightarrow \quad I \leq \pm 0,001 \text{ mm}$$

Teniendo en cuenta los instrumentos disponibles en un laboratorio de metrología es razonable adoptar en este caso otra relación T/I mas próxima al otro extremo del intervalo anteriormente definido por la “Regla de Oro generalizada de la metrología”:

$$3 [ T/I ] 10$$

Se podría justificar el empleo de la relación ( $T/I \cong 3$ ) desde el análisis del tipo de distribución estadística de un proceso productivo de muy buena precisión, de distribución simétrica y con baja dispersión (figura 4), donde el % de rechazo de piezas en tolerancia es bajo, a pesar de que  $T_c \ll T$ .

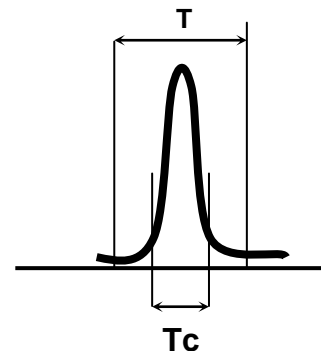


Figura 4

En general, las distribuciones de los procesos industriales tienen dispersiones de diferente monto, y en función de las mismas puede adoptarse cualquier valor para la relación T/I.

### Resolución de un ejemplo

Cota: Diámetro de un eje:  $20 \pm 0,1 \text{ (mm)}$

Donde: El valor 20 representa el valor nominal de la cota y  $T = \pm 0,1 \text{ mm}$  su tolerancia.

Aplicando la Regla de Oro, del listado de instrumentos disponibles del laboratorio se obtiene el instrumento cuya incertidumbre verifique que:

$$I \leq \pm 0,01 \text{ mm}$$

Seleccionamos, por lo tanto un micrómetro de exteriores de 0 - 25 mm cuyos datos son:

$$I (\mu\text{m}) = \pm (2 + L/75) = 2,26666\mu\text{m} = 0,002666 \text{ mm}$$

y  $A = 0,01 \text{ mm}$  (aproximación, fracción mínima que permite leer)

Se obtiene la Tolerancia corregida por la incertidumbre del instrumento  $T_c$ :

$$T_c = \pm (0,1 - 0,0026666) = \pm 0,0973334 \text{ mm}$$

La corrección de la tolerancia por la incertidumbre del instrumento determina las siguientes lecturas límites: 20,0973334 mm y 19,902667 mm.

Como el instrumento seleccionado tiene una aproximación de 0,01mm, los valores de lecturas obtenidos por cálculo no podrán leerse, más allá del segundo decimal.

Deberá efectuarse entonces un nuevo recorte a la tolerancia de fabricación T de la pieza, teniendo en cuenta ahora la aproximación del instrumento. Se obtiene, la tolerancia corregida por la aproximación

del instrumento  $T_c'$ , recortando el término decimal de  $T_c$  en el orden del decimal correspondiente a la aproximación. Para el ejemplo visto, resulta:

$$T_c' = \pm 0.09 \text{ mm}$$

Por lo tanto, en el control final de la cota, **las lecturas límites admisibles** para el operador, son :

$$20,09 \text{ y } 19,91 \text{ mm.}$$

Comúnmente se presenta como:

$$20 \pm 0.09$$

Esquemáticamente, en la figura 5 se observa que la tolerancia corregida por aproximación  $T_c'$  establece los nuevos límites admisibles para las lecturas,  $L_i'$  y  $L_j'$ .

Finalmente el total de las cotas relevadas, los instrumentos y accesorios utilizados, y los tiempos de medición se vuelcan en una planilla, la cual puede utilizarse como base de datos para el control estadístico del proceso de medición mismo, como del proceso de fabricación, y como base de protocolo en el convenio entre las partes proveedor-cliente.

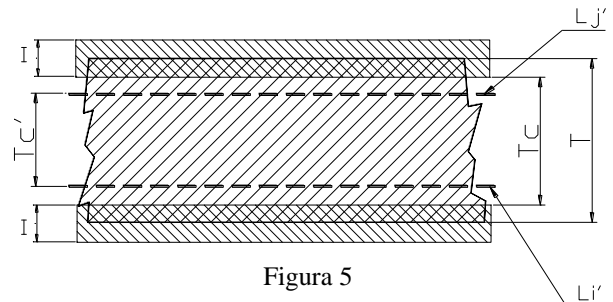


Figura 5

### Incertidumbre en las mediciones lineales directas e indirectas

Comenzaremos por distinguir dos diferentes tipos de mediciones:

**Mediciones directas:** La medida de la cota se obtiene en una única medición y con un instrumento de lectura directa.

**Mediciones indirectas:** La medida de la cota es el resultado de una serie de mediciones que finalmente se suman, restan, etc.

Un caso particular de las indirectas, son las mediciones por comparación, en donde las mediciones se realizan con comparadores y patrones.

La distancia entre centros de agujeros o ejes (distancia  $L$ , entre agujeros en la Figura 6), es otro ejemplo, pues siendo los centros elementos abstractos no es posible una determinación con un único instrumento de lectura directa.

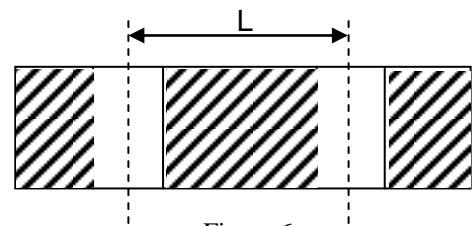


Figura 6

### Incertidumbre en la medición directa

Suponiendo que todos los errores derivados del ambiente y el operador son controlados (no significa que sean nulos), quedan como únicas causas de error las incertidumbres del instrumento de medición y de los accesorios de montaje o dispositivos auxiliares que se utilicen.

Por lo tanto, el valor de cada cota que se determina por medición directa, estará dado por:

$$L = L_L \pm I/2 \quad (1)$$

Donde:

**L:** Valor verdadero de la cota

**L<sub>L</sub>:** Valor leído

**I:** Incertidumbre del instrumento

El valor verdadero de la cota es indeterminado y podrá tomar cualquier valor comprendido entre un máximo **L<sup>+</sup>** y un mínimo **L<sup>-</sup>**

$$L^+ = L_L + I/2 \quad (2)$$

$$L^- = L_L - I/2$$

### Incertidumbre en la medición indirecta

Para analizar el caso de una medición de tipo indirecta, se presenta el ejemplo de la Figura 7.

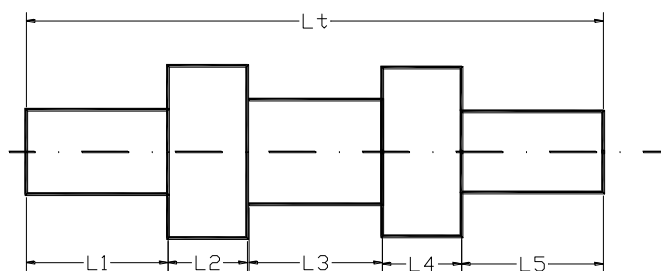


Figura 7

Hay dos opciones para obtener la medida de la cota **L<sub>t</sub>**:

- Medir **L<sub>t</sub>** en forma directa (haciendo contacto en los extremos de la pieza)
- Obtener la medida de **L<sub>t</sub>** como la suma de las medidas de los distintos tramos de la pieza de cotas **L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, .....y L<sub>5</sub>**. O sea:

$$L_t = \sum L_i$$

De acuerdo a la expresión (2), será:

$$L_1 = L_{L1} \pm I_1/2$$

$$L_2 = L_{L2} \pm I_2/2$$

.....

.....

$$L_5 = L_{L5} \pm I_5/2$$

Donde **I<sub>1</sub>** es la incertidumbre del instrumento que nos permite medir la cota **L<sub>1</sub>**, **I<sub>2</sub>** la propia para medir **L<sub>2</sub>**, etc.

Si todas las cotas se midieran con un Pie de Rey, las cotas **L<sub>1</sub>** y **L<sub>5</sub>** se miden con la cola del instrumento, las cotas **L<sub>2</sub>** y **L<sub>4</sub>** con la puntas de exteriores y la cota **L<sub>3</sub>** con las puntas de interiores del mismo instrumento. Resulta:

$$L_t \pm \frac{I_t}{2} = L_{L1} \pm I_1/2 + L_{L2} \pm I_2/2 + \dots$$

Donde:

**It:** Incertidumbre total en la medición indirecta

$$L_t^+ = L_{L1} + I_1/2 + L_{L2} + I_2/2 - \dots = (L_1 + L_2 + \dots) + \Sigma I_i / 2$$

$$L_t^- = L_{L1} - I_1/2 + L_{L2} - I_2/2 - \dots = (L_1 + L_2 + \dots) - \Sigma I_i / 2$$

Por lo tanto:

$$L_t \text{ indirecta} = L_t \pm \Sigma I_i / 2$$

$$L_t \text{ directa} = L_t \pm I / 2$$

Si el instrumento utilizado es único para todas las medidas y tiene una incertidumbre de:

$$I_i [\mu\text{m}] = \pm (a + L_i / c)$$

siendo **Li:** Longitud de la cota que se mide en mm  
**a y c:** Valores característicos del instrumento

**Método indirecto:**  $I_t = \pm \Sigma I_i / 2 = \pm (a \cdot n + \Sigma L_i / c)$

**Método directo:**  $I_t = \pm (a + L_t / c)$

Para un pie de rey cuya incertidumbre es:  $\pm (25 + 0,02 L) \mu\text{m}$ , resulta:

$$I_t = \pm (25 + 0,02 L_t) \mu\text{m} \quad \text{Método directo}$$

$$I_t = \pm (125 + 0,02 L_t) \mu\text{m} \quad \text{Método indirecto}$$

**CONCLUSION:** La incertidumbre en las mediciones indirectas es siempre mayor que en las mediciones directas (Otro modo de cálculo es por la Ley de propagación de errores, visto en Física).

Otro ejemplo:

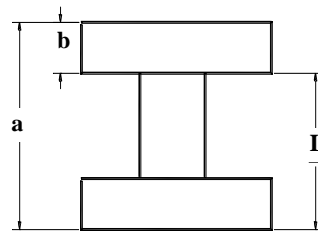


Figura 8

Para la pieza de la Figura 8, no se dispone del instrumento adecuado para medir la cota **L**, por lo tanto se miden las cotas **a** y **b** con instrumentos de incertidumbre **Ia** e **Ib**. Resulta:

$$L = a - b$$

El valor máximo posible de la cota **L** (**L<sup>+</sup>**) lo tendremos cuando **a** tome su valor máximo (**a + Ia / 2**) y la cota **b** el mínimo, o sea (**b - Ib / 2**). Por lo tanto:

$$\underline{L}^+ = (a + I_a / 2) - (b - I_b / 2) = \underline{(a - b) + (I_a / 2 + I_b / 2)}$$

Por lo contrario **L** será mínimo (**L<sup>-</sup>**) cuando el valor de la cota **a** sea mínimo y **b** sea máximo

$$\underline{L}^- = (a - I_a / 2) - (b + I_b / 2) = \underline{(a - b) - (I_a / 2 + I_b / 2)}$$

Lo anterior puede expresarse como:

$$L \pm It/2 = a - b \pm (Ia /2 + Ib /2)$$

Puede observarse que la incertidumbre total, se obtiene sumando las incertidumbres de cada una de las mediciones, independientemente de que las cotas se sumen o se resten.

**CONCLUSION:** La incertidumbre total en las mediciones lineales indirectas está dada (siempre) por la suma de las incertidumbres de cada una de las mediciones parciales realizadas.

$$It = \Sigma Ii$$

**Nota:** Al comenzar el análisis, se estableció la eliminación del resto de los factores (temperatura diferente a la temperatura de referencia, defecto de cero, etc.) que influyen en el proceso de medición. El planteo consiste en que esos factores de algún modo han sido controlados, su variación en algunos casos puede ser definida y podrá corregirse la medida final de la cota.

### Mediciones por comparación

Como ya se dijo, son un caso particular de las indirectas. El instrumento (comparador) se calibra (posición cero en la escala) con un patrón de referencia de cota nominal  $a$  (Figura 9). A continuación se reemplaza el patrón por la pieza a controlar y se lee en la escala la diferencia de medida (positiva o negativa) entre la cota que se mide y la cota nominal del patrón.

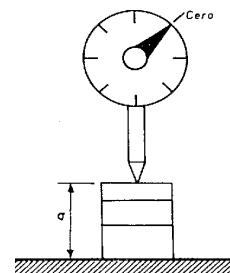


Figura 9

Para determinar la medida de la cota se suman la cota nominal de valor  $a$  más el valor leído en la escala del comparador (con su signo).

Siguiendo el cálculo efectuado para los ejemplos dados, la incertidumbre de medición estará dada por la incertidumbre del comparador y la imprecisión propia de la pieza adoptada como patrón de referencia. Si la cota nominal resulta de la combinación de distintos bloques patrón, la suma de las incertidumbres de cada uno de ellos será la incertidumbre  $Ic$  que introduce la combinación.

Se deduce la importancia que tiene la precisión con que se fabricó el patrón de referencia.

$$It = Ic + Ia$$

**IMPORTANTE:** La selección del método y los instrumentos de medición para las mediciones indirectas también debe tener en cuenta la Regla de Oro de la metrología, es decir:

$$\Sigma Ii [ 0,1 T$$

Como resultado de ello, los valores de incertidumbre pueden resultar muy pequeños y difíciles de satisfacer. La solución está en la revisión del método de medición, reduciendo el número de determinaciones, accesorios y número de instrumentos, a efectos de disminuir la incertidumbre total.

### Controles de medida en una pieza durante un proceso de mecanizado

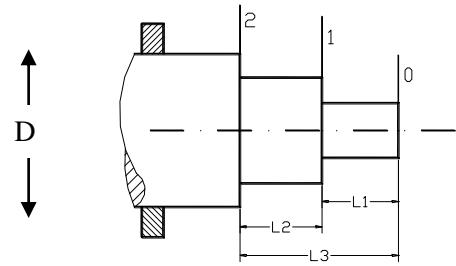
Otra aplicación de mediciones de tipo indirectas son los controles de medida de las diversas cotas que forma parte de una pieza durante el proceso de mecanizado, las cuales se vinculan entre sí según una determinada secuencia.



**Ejemplo:** Torneado de una pieza. De una barra cilíndrica de diámetro D se obtienen por torneado los sectores de longitudes L1 y L2 (ó L3), respectivamente (figura 10).

Una secuencia posible es:

- A) Mecanizar el **tramo 0-1** , se mide **L1** desde el plano **0**.  
(El plano 0 se adopta como referencia)
- B) Mecanizar el tramo **1-2** y se verifica la posición del plano **2** midiendo desde el plano **0** o desde el plano **1**.



Las incertidumbres resultan:

$$I_A (L3) < I_B (L1+L2)$$

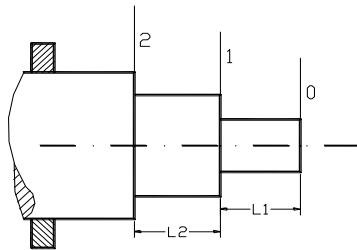
Figura 10

En el ejemplo, las dimensiones posibles de acotar en el plano son tres (L1,L2 y L3), sin embargo serán solo dos las que corresponde acotar, pues siempre una de ellas surge de la suma (o diferencia) de las otras dos.

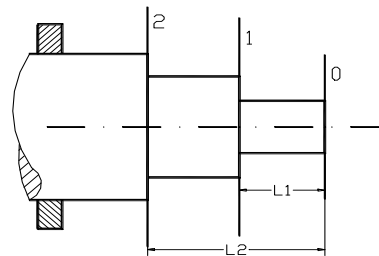
De la funcionalidad de la pieza, particularmente de cada una de sus partes, dependerán cuales son las cotas a indicar en el plano, y sus tolerancias.

**Formas de acotación en los planos**

Se tienen de dos tipos: incremental o absoluta (figura 11).



Acotación incremental



Acotación absoluta

Figura 11

La forma de acotación condiciona el modo de medir tanto para el control durante la producción como en el control final de la pieza, indicando a su vez el plano de referencia. Para el tipo incremental habrá mas de un plano de referencia para cada cota, en el ejemplo son los planos 0 y 1, mientras que para el absoluto es único (plano 0). En el tema “Ajustes y tolerancias en cadenas dimensionales” se analiza la influencia de la forma de acotación sobre la precisión obtenida en las piezas.

**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