

3. Control dimensional: ángulos

3.1. Magnitudes angulares y control

La unidad de ángulo plano en el Sistema Internacional de Unidades es el radián, que puede definirse como el ángulo que, teniendo su vértice en el centro de un círculo, intercepta sobre la circunferencia de dicho círculo un arco cuya longitud es igual a la del radio. El radián es una unidad derivada del (SI).

Para pasar de radianes a grados sexagesimales o viceversa hay que tener en cuenta la equivalencia:

$$360^\circ = 2\pi \text{ radianes}$$

El control de las magnitudes angulares puede realizarse por diversos métodos que se describen a continuación brevemente:

- **Métodos directos:** se emplean cuando las magnitudes angulares pueden ser medidas directamente por medio de instrumentos tales como los goniómetros.
- **Métodos indirectos:** se emplean cuando las magnitudes angulares no son medibles directamente y es preciso recurrir a otras asociadas con ellas, en cuyo caso se utilizan los niveles.
- **Métodos trigonométricos:** sirven para realizar el control de magnitudes angulares en piezas prismáticas y de revolución, tanto interiores como exteriores, basándose en relaciones trigonométricas y en el empleo de bloques Micyl.
- **Métodos basados en la comparación:** se emplean para realizar controles de magnitudes angulares por comparación con otras de valor conocido.

3.1.1. Patrones de ángulo (04)

La clasificación de instrumentos de metrología dimensional del Sistema de Calibración Industrial (SCI) recoge dos tipos de patrones de ángulo:

(04.01), Polígono patrón.

(04.02), Bloques patrón longitudinales.

Además de estos tipos de bloques, conviene considerar dos tipos más de patrones de ángulo: los discos de trazos y la regla de senos, ya que ambos son muy utilizados. Los discos de trazos, como patrón de referencia interna en dispositivos de medida; la regla de senos, en la formación de patrones con ayuda de otros elementos, como los bloques patrón longitudinales. Adicionalmente, y en aplicaciones especiales, cabe citar las escuadras y los cilindros de perpendicularidad que materializan únicamente ángulos de 90° , los prismas patrón que materializan un único ángulo y diferentes tipos de montajes patrón que posibilitan la formación indirecta de ángulos partiendo de elementos metrológicos de utilización no específica como las varillas calibradas y los bloques patrón longitudinales.

Todo ello permite enumerar la siguiente clasificación de los patrones de ángulos.

Patrones de ángulo		
De trazos	Disco circular graduado	
	Disco circular óptico	
Materiales	Directos	Escuadra
		Cilindro
		Prisma patrón
		Polígono regular patrón
		Bloques patrón angulares
	Indirectos	Regla de senos
		Montajes patrón

Tabla 1. Patrones de ángulos, materiales y de trazos.

3.1.1.1. Patrones angulares de trazos, disco circular graduado

Se construyen este tipo de patrones principalmente en acero, aunque también en cerámica o vidrio. En los diferentes tipos llevan grabados trazos dispuestos circunferencialmente a intervalos de 1° o de 30° . Su principal aplicación viene dada como integrantes de equipos y dispositivos de medida, en instrumentos tales como los transportadores o platos divisores.

3.1.1.2. Patrones angulares de trazos, disco circular óptico

Se construyen en diversos materiales: acero, aluminio, cerámica, vidrio, etc. y consisten en un disco circular que va provisto de un conjunto de pistas concéntricas en las que están grabadas dos tipos de zonas con características ópticas diferenciadas, blancas y negras, alternadas según un código binario. Este tipo de patrón se emplea como elemento de referencia interno en equipos de medida que poseen señal de tipo digital y en los que la posición angular es transducida mediante un lector óptico, que genera una señal que puede ser introducida en un ordenador.

3.1.1.3. Patrones angulares materiales, escuadra (06.02)

Los diferentes tipos de escuadras que materializan distintos valores angulares son consideradas como patrones angulares por el Sistema de Calibración Industrial (SCI), salvo las escuadras de perpendicularidad, que se clasifican como patrones de perpendicularidad, pero que se incluyen en este apartado, ya que el ángulo de 90° puede ser considerado como un valor angular más.

Son instrumentos que materializan un ángulo fijo entre dos superficies planas, se fabrican en acero de alta calidad templado y rectificado, con distintas variantes de forma como pueden ser bordes de las hojas biselados, con base ancha, hoja delgada, etc.

El vértice del ángulo interior suele estar ranurado, por lo que se facilita la comprobación de las piezas de aristas vivas según muestra la Figura 1. Las escuadras también pueden fabricarse en granito.

La norma alemana DIN 875 contempla dos calidades diferentes de escuadras en función de la tolerancia de perpendicularidad (t) permitida en estos patrones:

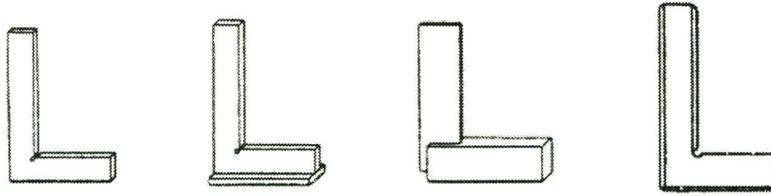


Figura 1. Diversos tipos de escuadras: de prueba, de tacón, de lámina y biselada.

CALIDADES	TOLERANCIAS
Grado 00	$t = (2 + L/100) \mu\text{m}$
Grado 0	$t = (5 + L/50) \mu\text{m}$

Tabla 2. Tolerancias y calidades en escuadras.

Donde (L) es la longitud de la hoja mayor expresada en milímetros. También podemos considerar como escuadras las miras de espejo, que constituyen un accesorio en los autocolimadores.

3.1.1.4. Cilindro de perpendicularidad (06.03)

Se trata de piezas metálicas o de granito de forma cilíndrica, en las que la perpendicularidad entre la superficie cilíndrica y una de las bases se garantiza con gran precisión para cualquier orientación circular.

Los patrones de perpendicularidad más frecuentes son metálicos, fabricados en acero y en uno de cuyos extremos se dispone de un asa para facilitar su manejo; la otra base y la superficie cilíndrica constituyen propiamente el patrón.

Aunque no existe normativa que recoja los grados de precisión de los cilindros de perpendicularidad, suele ser habitual considerar una tolerancia de perpendicularidad del orden de la tercera parte de la que se obtiene en las escuadras de Grado 00:

$$t = (0.7 + L/300) \mu\text{m}$$

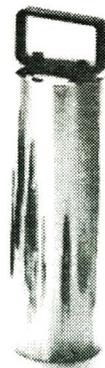


Figura 1. Cilindro de perpendicularidad.

3.1.1.5. Prisma patrón

Los prismas patrón, también denominados diedros de referencia, son piezas prismáticas entre dos, cuyas caras materializan un cierto valor angular. Estos elementos se utilizan bien para fines muy específicos o como accesorios en algunas operaciones metrológicas.

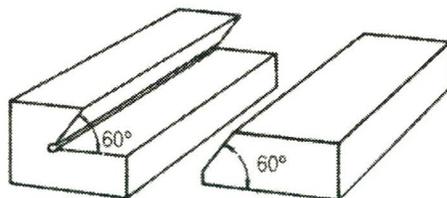


Figura 2. Prismas patrón.

3.1.1.6. Polígono óptico

Se trata de una pieza prismática de poca altura, cuya sección recta es un polígono regular. Entre cada dos de sus caras laterales consecutivas se materializa cierto ángulo, que lógicamente es función del número de lados del polígono. Las caras que materializan los patrones de ángulo están lo suficientemente pulidas como para posibilitar la reflexión óptica, aunque no existe una limitación teórica. En la práctica, no suelen sobrepasarse los 72° para permitir que el área de las caras permita aplicar sobre ellas un autocolimador o instrumento similar. Su uso constituye una forma sencilla de proceder a la verificación y calibración de

ángulos. El patrón cubre ángulos entre 5° y 120° . El orificio central permite su fijación en diferentes posiciones.

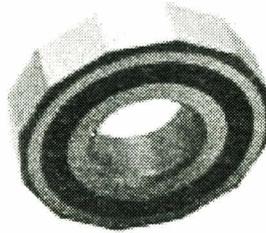


Figura 4. Polígono regular patrón.

Grado de Precisión	Planitud en el área del objetivo*	Precisión de calibración (Incertidumbre)	Desvío máximo de las caras en relación nominal
Referencia 0	0.10 μm (4 μm)	$\pm 1.0''$	3-12
Calibración			$\pm 1.0''$
			$\pm 2.0''$

Tabla 3. Grados de precisión de un polígono óptico.

3.1.1.7. Bloques patrón angulares

Se trata de piezas paralelepípedicas tales que, entre dos de sus caras, situadas opuestamente entre sí, se materializa cierto ángulo. Estos bloques, al igual que los longitudinales ya estudiados, pueden unirse entre sí por adherencia para formar patrones compuestos. Pero es preciso reseñar una particularidad que los caracteriza: su capacidad para poder unirse tanto aditivamente como sustractivamente, lo que posibilita que con un número reducido de los mismos se puedan formar numerosos nominales tal como muestra a continuación la Figura 5.

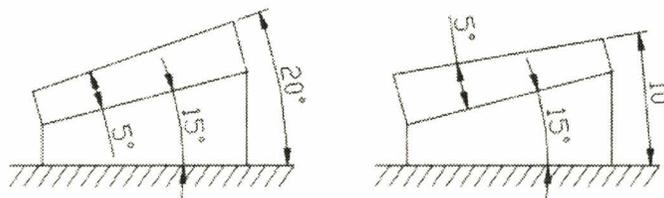


Figura 5. Montaje aditivo y sustractivo de los bloques patrón angulares.

El juego más usual de bloques patrón angulares es el que está formado por tan solo 17 piezas con los siguientes nominales:

- 6 bloques de 1, 3, 5, 15, 30, 45 grados sexagesimales.
- 5 bloques de 1, 3, 5, 20, 30 minutos sexagesimales.
- 5 bloques de 1, 3, 5, 20, 30 segundos sexagesimales.
- 1 bloque con 4 ángulos de 90° sexagesimales.

Teniendo en cuenta la capacidad de montaje tanto aditiva como sustractiva de los bloques patrón angulares, con los 17 elementos citados pueden formarse todos los patrones angulares existentes con escalonamiento de (1") un segundo sexagesimal.

Las calidades de estos bloques aún no están recogidas por la normativa UNE, sin embargo, las comúnmente admitidas son las siguientes:

CALIDAD	DESVIACIÓN MÁXIMA AL NOMINAL
Calidad 00	$\pm 0.25''$
Calidad 0	$\pm 0.5''$
Calidad 1	$\pm 1''$

Tabla 4. Calidades y desviaciones máximas en bloques patrón angulares.

3.1.2. Instrumentos de medida de magnitudes angulares

Para medir magnitudes angulares se emplean diferentes instrumentos: transportadores y goniómetros, además, como transportadores se emplean también las llamadas falsas escuadras.

3.1.2.1. Falsas escuadras

Las falsas escuadras son «instrumentos» fijos para el control de las magnitudes angulares, sirven para comprobar ángulos y también se utilizan en el trazado.

La Figura 6, a continuación, muestra una falsa escuadra sencilla. Se compone de dos brazos articulados en un eje que se pueden abrir a mano según un ángulo cualesquiera y permite medir tanto ángulos agudos como obtusos. Sin embargo, la falsa escuadra no proporciona directamente la medida del ángulo, por lo que se

precisa otro instrumento dotado de escala, para conocer el valor de la apertura de sus brazos, constituyendo la falsa escuadra un ejemplo de medida por transferencia.

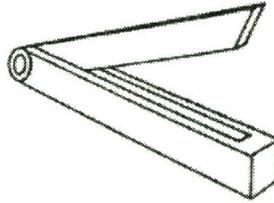


Figura 6. Falsa escuadra.

3.1.2.2. Goniómetro de taller

El goniómetro simple o de brazo móvil, también denominado transportador de ángulos de taller, es un instrumento de baja precisión que se emplea tanto para medir como para trazar y transportar ángulos. Está formado por un semicírculo dividido en 180° . El brazo-regla gira alrededor de un eje situado en el centro del semicírculo.

La magnitud angular a medir ha de ser abarcada entre uno de los lados del brazo-regla y uno de los radios del semicírculo. El instrumento se muestra a continuación en la Figura 7.

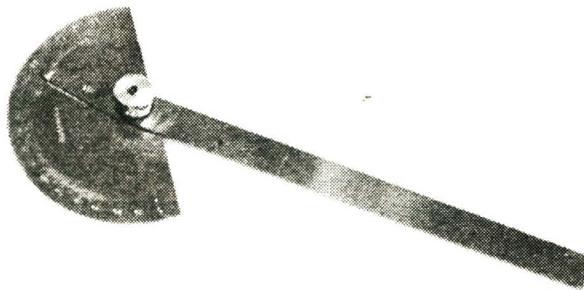


Figura 7. Goniómetro simple o de brazo móvil.

Goniómetro de precisión

Los goniómetros de precisión más comunes son: el goniómetro universal tanto mecánico como óptico y la escuadra universal o combinada.

El goniómetro es un instrumento diseñado para el control de magnitudes angulares que consta de los elementos siguientes: regleta o regla móvil, tornillo

de fijación de la regleta, tornillo de inmovilización, limbo, *nonius* y cuerpo principal.

El cuerpo principal está constituido por una escuadra con un círculo metálico adosado que contiene el limbo en el que se halla la escala principal del instrumento. La escala está dividida en cuatro cuadrantes que van de 0° a 90° con divisiones en grados. Concéntricamente con él, gira un disco central que puede inmovilizarse por medio del tornillo unido al eje central. En el disco concéntrico interior va grabado el *nonius* del instrumento, por lo que tiene un sistema de escalas paralelas (similar al del pie de rey).

La regla móvil o regleta tiene una dimensión fija, generalmente 300 mm, y lleva sus extremos biselados formando ángulos de 45° y 60° respectivamente, muy útiles para mediciones especiales. Esta regleta va provista de una ranura central que permite su desplazamiento longitudinal y también el bloqueo en una posición determinada de su recorrido mediante el tornillo de fijación de la misma según se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Goniómetro de precisión con brazo suplementario. (Mitutoyo).

Resulta evidente que al estar dividida la escala principal del instrumento o limbo en 4 cuadrantes de 0° a 90° , el goniómetro no puede por su propio diseño escalar medir directamente ángulos mayores de 90° .

Lectura del *nonius*

El goniómetro posee dos *nonius*, el derecho y el izquierdo. El *nonius* derecho se empleará cuando el sentido de crecimiento de la magnitud angular en la

graduación del limbo se oriente hacia la derecha; y el izquierdo, cuando el sentido de crecimiento de la magnitud angular abarcada en la graduación del limbo esté orientado hacia la izquierda.

Cálculo de la sensibilidad o apreciación

La sensibilidad del *nonius* de un goniómetro puede calcularse de varias formas, aplicando la regla general por la que:

$$S = \frac{d}{n}$$

d = división menor de la regla principal (1°)

n = número de divisiones del *nonius* (12).

$$S = \frac{1^\circ}{12} = 5'$$

Al igual que podía ocurrir en el caso de los calibres, este instrumento utiliza un *nonius* alargado.

En el *nonius* alargado, 23 divisiones del limbo se convierten en 12 divisiones en el *nonius*. En este caso, la sensibilidad de ese *nonius* será:

$$S = 2d - d_v = 2^\circ - 23/12 = 24 - 23/12 = 1/12 = 5'$$

La sensibilidad puede calcularse indistintamente de ambas formas.

Manejo

El manejo del goniómetro no resulta difícil, si bien requiere de cierta experiencia, que permita contemplar todas sus posibilidades de posicionamiento para la toma de la medida y la elección de la más idónea en cada caso, ya que existe una gran variedad de posiciones que se pueden adoptar como muestra la Figura 10, a continuación. Algunas magnitudes angulares resultan muy fáciles de abarcar con el goniómetro, sin embargo, cuando la magnitud angular que se desea medir no está materializada en la pieza, sino que es la prolongación de dos caras laterales, no resulta en ocasiones tan evidente y requiere de un brazo suplementario

Algunos goniómetros van provistos de un brazo suplementario que permite abarcar magnitudes angulares que no podrían medirse sin su ayuda, tal como se muestra en la Figura 10.

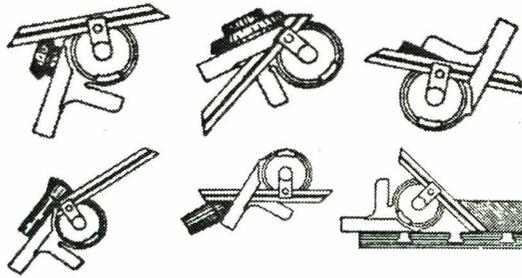


Figura 9. Distintas posiciones de medida que puede adoptar un goniómetro de precisión.

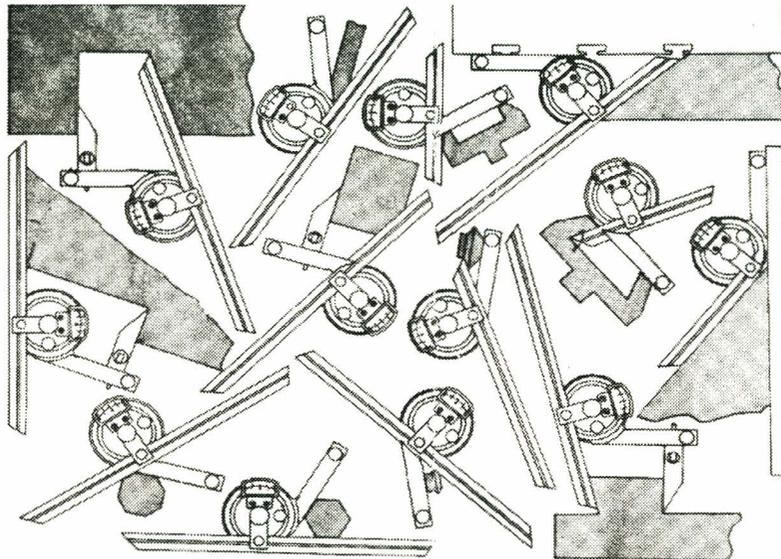


Figura 10. Distintas posiciones de medida con un goniómetro con brazo suplementario.

3.1.2.2.1. Reglas para la interpretación de la medida con un goniómetro

Por su forma de medir, es preciso resaltar que, en el caso del goniómetro, hay que separar dos conceptos distintos: lectura en el goniómetro (nunca superior a 90°) y valor del ángulo medido (cualquier valor).

Además de lo expuesto sobre este instrumento, es necesario proporcionar el método práctico de medida para poder deducir a partir del valor leído el valor del ángulo buscado (α). Para ello, es importante tener en cuenta con cuál de los lados de la escuadra se está midiendo. Si se mide con la parte vertical de la escuadra o lado paralelo a la línea de ceros en el limbo, o si, por el contrario, se está midiendo

con la parte horizontal de la escuadra o parte paralela a la línea de 90° en el limbo. En cada caso, habrá que proceder de forma diferente, ya que la lectura en este instrumento puede reflejar en los diferentes casos valores de ángulos diferentes al que se está midiendo, pero que guardan relación con él, relación que depende de con qué parte de la escuadra se esté llevando a cabo la medición:

Midiendo con la parte de la escuadra paralela a la línea de 0° en el limbo

Si $\alpha < 90^\circ$, el valor de (α) es el **complementario** del valor leído.

Si $\alpha > 90^\circ$, el valor de (α) es el **valor leído $+90^\circ$** .

Midiendo con la parte de la escuadra paralela a la línea de 90° en el limbo

Si $\alpha < 90^\circ$, el valor de (α) **coincide** con el valor leído.

Si $\alpha > 90^\circ$, el valor de (α) es el ángulo **suplementario** del valor leído.

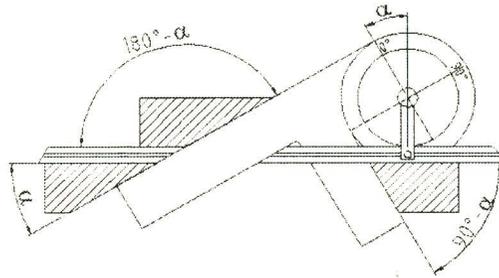


Figura 11. Valores de (α) según la posición de medida.

A estas reglas prácticas de medida hay que añadir el problema que supone la medición de ángulos muy próximos a 90° , de los que no resulta sencillo saber con exactitud si se trata de ángulos agudos u obtusos. En este caso, se procede de la forma siguiente:

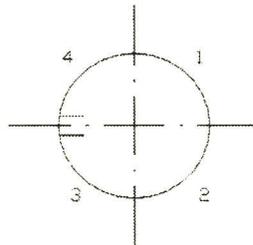


Figura 12. Los ángulos próximos a 90° en el tercer cuadrante son agudos; los ángulos próximos a 90° en el cuarto cuadrante son obtusos.

Si el ángulo se presenta en el tercer cuadrante ($\alpha < 90^\circ$), la lectura es directa. Si se está midiendo en el cuarto cuadrante ($\alpha > 90^\circ$), el valor del ángulo (α) es el suplementario del valor del ángulo leído.

Precauciones de manejo con el goniómetro

Antes de efectuar la lectura de la medida es preciso asegurarse de que tanto el lado de la escuadra correspondiente como la regla del goniómetro estén correctamente apoyadas en la pieza y perfectamente ajustadas.

3.1.2.2.2. Goniómetro óptico

Es un goniómetro similar al anterior, si bien, la diferencia estriba en que en este tipo de instrumento la lectura de la medida se realiza a través de un visor que proporciona directamente el valor en grados y minutos, evitando tener que buscar la coincidencia de trazos de la escala principal con el *nonius* para determinar los minutos, como en el anterior.

El mecanismo de bloqueo de la regla se efectúa con una palanca o freno. El bloqueo del limbo se consigue girando ligeramente el tambor moleteado. El visor u ocular permite el enfoque de la escala.



Figura 13. Goniómetro óptico. (Mitutoyo).

3.1.2.2.3. Escuadra universal o combinada

Este goniómetro es muy versátil, se utiliza en trabajos de trazado y consiste en una regla graduada, una cabeza cuadrada, un transportador de centrado y un cabezal reversible. La regla graduada se combina con las otras tres partes de la escuadra universal para diversas operaciones de trazado, preparación o inspección de ángulos. El cabezal de escuadra y la regla, que son los elementos de la escuadra básica, pueden emplearse para trazar líneas paralelas a un borde o para el trazado de ángulos de 45° y de 90° con respecto a un borde. Además, el cabezal puede desplazarse a lo largo de la regla graduada y puede emplearse incluso para medir profundidades. El transportador puede adaptarse a cualquier

ángulo de 0° a 180° . El cabezal centrador forma una escuadra de centrar cuando se monta sobre una regla y también puede servir para localizar los centros de perfiles redondos, cuadrados u octogonales. Su precisión es de $(30')$ sexagesimales. Las Figuras 14 y 15 lo muestran a continuación:

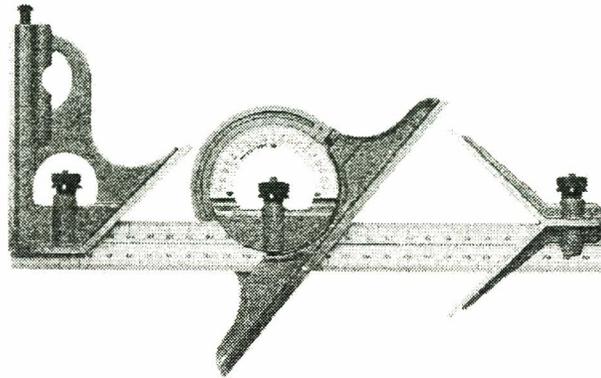


Figura 14. Escuadra universal o combinada y usos de la cabeza cuadrada, la cabeza de centrado y el cabezal reversible. (Mitutoyo).

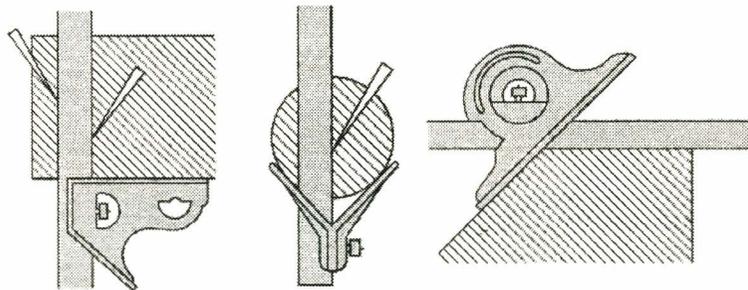


Figura 15. Usos: cabezal cuadrado, cabeza de centrado y cabezal reversible de escuadra universal. (Mitutoyo).

3.1.2.3. Regla de senos (05.03)

La configuración más simple de una regla de senos es la formada por una barra prismática que está apoyada permanentemente sobre dos rodillos cilíndricos iguales, de ejes paralelos entre sí y contenidos en un plano paralelo a la superficie superior de la misma. La longitud (L) de la regla entre los centros es una constante realizada con una enorme precisión. En uno de sus extremos la regla va provista de un tope que sirve para evitar el deslizamiento de la pieza que se sitúa sobre ella. La regla de senos se muestra, a continuación, en la Figura 16.

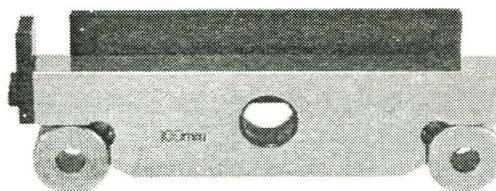


Figura 16. Regla de senos. (Mitutoyo).

La regla de senos posibilita la formación de patrones angulares indirectos de una forma sencilla y estable con la ayuda de bloques patrón longitudinales y mediante diferentes montajes como el que muestra la Figura 17, de donde se deduce la siguiente expresión:

$$\text{sen}(\alpha) = \frac{H - h}{L}$$

Como puede apreciarse, la expresión funcional que posibilita la obtención del valor angular es de tipo trigonométrico y contiene la función seno, de la que proviene la denominación adoptada para este dispositivo. Además de una alta precisión constructiva, es necesario el conocimiento del valor de la longitud de la regla de senos (L) con una gran precisión y también el de su incertidumbre.

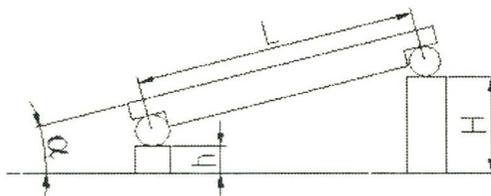


Figura 17. Patrón angular, montaje con la regla de senos y bloques patrón longitudinales.

Las reglas de senos solo se utilizan en la formación de patrones menores de 45° , pues la precisión de los patrones formados con ella va disminuyendo al aumentar los valores del ángulo a materializar.

En metrología, el objeto principal de una regla de senos es encontrar el valor de ángulos tanto en piezas prismáticas como en piezas de revolución.

A la regla de senos puede dotársela de un calzo o de soportes entre puntos para medir piezas de revolución.

La regla de senos permite diferentes montajes para la medición de piezas prismáticas, de piezas de revolución sin centros y de piezas de revolución con

centros, en el trazado angular de referencias, como elementos auxiliares en la medida de ángulos y sirve también en la calibración de elementos de medida.

Cuando la pieza a colocar por su tamaño no puede situarse sobre la regla de senos, se puede utilizar la llamada mesa de senos, que bajo el mismo principio proporciona una mayor superficie de apoyo.

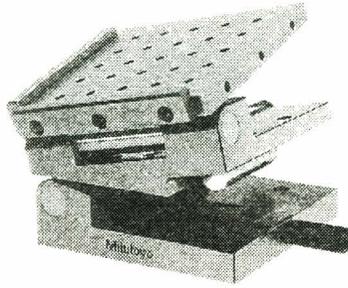


Figura 18. Mesa de senos. (Mitutoyo).

Montajes patrón

Además de los patrones de carácter indirecto que se pueden realizar con la regla de senos y los bloques patrón longitudinales, pueden constituirse patrones angulares valiéndose de distintos elementos y patrones metroológicos no específicos de la metrología de ángulos, tales como los bloques patrón longitudinales, cilindros calibrados y esferas calibradas utilizados en diferentes montajes.

La ventaja que representan los patrones constituidos de esta forma es que pueden resolver el problema de disponer de un patrón angular determinado sin llevar a cabo un desembolso específico para ello y sin pérdida de tiempo. Un ejemplo puede ser la materialización de dos ángulos de 60° y de 120° mediante tres cilindros patrón del mismo diámetro.

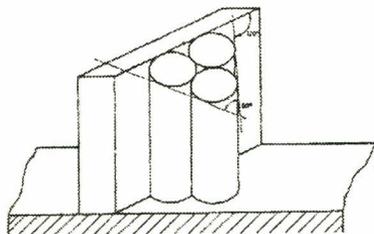


Figura 19. Montaje patrón por agrupamiento de cilindros calibrados y bloque patrón.

El control de magnitudes angulares requiere utilizar métodos trigonométricos cuando los ángulos a medir no son prolongaciones de bordes planos abarcables con los brazos de un goniómetro de precisión. El caso más habitual se presenta cuando es preciso controlar los ángulos de piezas cónicas, troncocónicas, como pueden ser conos MORSE ⁽¹⁾, conos ISO, etc. En estos supuestos hay que recurrir a métodos basados en relaciones trigonométricas. Dependiendo del caso se pueden utilizar métodos diferentes:

1. Con la regla de senos y reloj comparador.
2. Por medición sobre cilindros patrón (conicidades interiores de grandes dimensiones).
3. Por medición mediante esferas calibradas (conicidades interiores de pequeñas dimensiones).
4. Por medición mediante esferas calibradas (conicidades exteriores).

(1) El cono MORSE, en inglés *MORSE Taper*, es un acoplamiento cónico habitual en muchas máquinas herramientas que sirve para adaptar y acoplar accesorios y herramientas a las mismas. Sus dimensiones están normalizadas y van del cero al siete, su conicidad se expresa en porcentaje, la notación inglesa es MT1, MT2, etc.

1. Con la regla de senos y reloj comparador

Dependiendo del tamaño de la pieza a controlar, se puede utilizar la regla de senos o bien la mesa de senos. Se coloca en una posición tal que la generatriz superior quede en horizontal, lo que se controla con la ayuda de un reloj comparador que, de ser así, presentará un valor constante a lo largo de la misma. Una vez lograda la posición que proporciona la horizontalidad de la generatriz, el seno del ángulo (α) que forma la regla o la mesa y que resulta conocido en función de la expresión, permite conocer el valor del mismo (α) y por la relación trigonométrica que establece la igualdad entre ángulos opuestos por el vértice, se obtiene el valor del semiángulo del cono y su ángulo que será (2α).

$$\operatorname{sen}(\alpha) = \frac{H - h}{L}$$

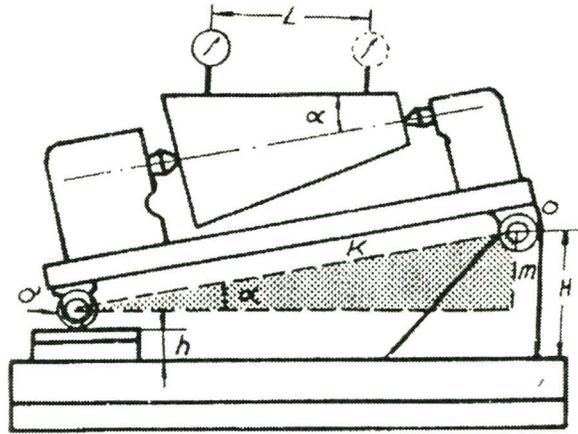


Figura 20. Montaje sobre regla de senos con reloj comparador.

2. Por medición sobre cilindros patrón para conicidades interiores

Cuando la conicidad interior cuyo ángulo se desea conocer es de dimensiones grandes, el ángulo puede medirse determinando las cotas (L_1) y (L_2) entre esferas del mismo diámetro, siendo (H) la altura de las calas sobre las que se apoyan las esferas para efectuar la medición. El valor del semiángulo (α) del cono puede calcularse basándose en las siguientes expresiones:

$$C = \frac{L_1 - L_2}{H}$$

$$\tan(\alpha) = \frac{L_1 - L_2}{2H}$$

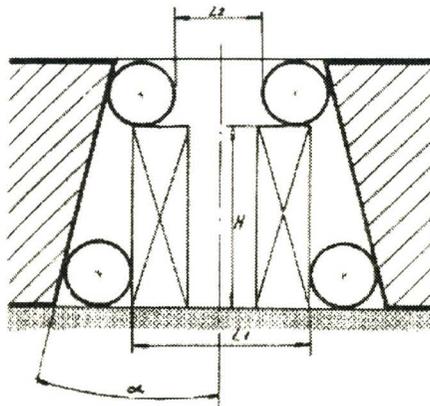


Figura 21. Medición mediante cilindros patrón del ángulo en una conicidad interior.

3. Medición mediante esferas calibradas para una conicidad interior

Este método de medición se emplea cuando se trata de medir el ángulo de un cono interior de pequeñas dimensiones, no como en el supuesto anterior, y exige la utilización de esferas calibradas. Se puede medir sobre esferas previamente introducidas en el agujero, pudiendo determinarse la separación (L) entre los centros de ambas esferas, siendo respectivamente (R) y (r) los radios de las mismas. El semiángulo (α) del cono se determina mediante la siguiente expresión:

$$\text{sen}(\alpha) = \frac{R - r}{L}$$

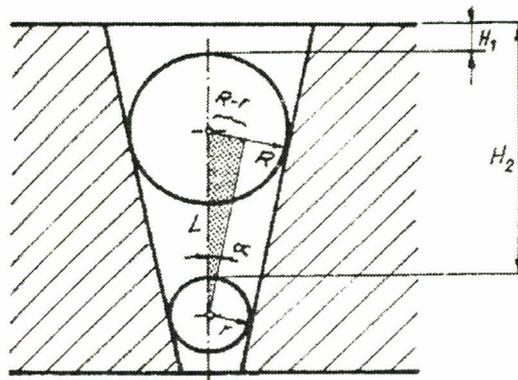


Figura 22. Medición de conicidad interior mediante esferas calibradas.

4. Por medición mediante cilindros calibrados, para conicidades exteriores.

De la cota (M), cota medida sobre cilindros de radio (r), se puede deducir el diámetro del cono que es $d = M - 2n - 2r$, pero siendo:

$$n = \frac{r}{\tan \beta} \text{ y a su vez } \beta = \frac{90 - \alpha}{2}$$

El valor del Diámetro mayor (D) del cono también se puede determinar por cálculo, puesto que se conoce el valor del ángulo del cono y, por tanto, su conicidad (c), de lo que resulta que:

$$D = d + C \cdot L \text{ o también } D = d + 2 \tan(\alpha) \cdot L$$

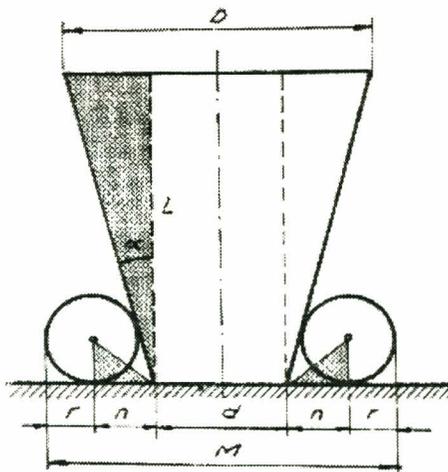


Figura 23. Medición de conicidad exterior mediante cilindros calibrados.

Aunque este tema trata sobre el control de magnitudes angulares, en las conicidades conviene tener en cuenta que, en el control metroológico de piezas cónicas, además de la medición del ángulo de conicidad, es necesario controlar aspectos tales como la rectitud de las generatrices o la redondez de las secciones normales.

3.2. Control de formas elementales

3.2.1. Evaluación de formas elementales

La metrología geométrica abarca distintas áreas de actuación. Una de ellas es la dimensional, que comprende los controles referidos a longitudes y ángulos. Otra parte, que se va a tratar en este apartado, es la concerniente a las formas, que incluye los siguientes controles: rectitud, planitud, redondez y cilindricidad tanto de cualquier línea como de cualquier superficie.

La Tabla 5 permite situar las diferentes partes de la metrología geométrica dentro del conjunto de todas las áreas de la misma.

METROLOGIA GEOMÉTRICA					
Macrogeometría					Microgeometría
Dimensiones	Formas	Orientaciones	Situaciones	Oscilación	Características superficiales
Longitud	Rectitud	Paralelismo	Posición	Radial	Perfil completo
Ángulo	Planitud	Perpendicularidad	Concentricidad	Axial	Ondulación
	Redondez	Inclinación	Simetría		Rugosidad
	Cilindricidad				
	De cualquier línea				
	De cualquier superficie				

Tabla 5. Metrología geométrica, ramas y áreas de actuación.

El control de formas elementales posee gran importancia metrológica, por ejemplo, la rectitud desempeña un papel fundamental en el buen funcionamiento de muchas máquinas herramientas como son las de control numérico y en las máquinas de medida, en las que resulta imprescindible que sus elementos móviles posean movimientos precisos y bien definidos.

En cuanto a la planitud, su control resulta fundamental en las operaciones previas a la construcción de piezas y elementos mecánicos como es el trazado, ya que es preciso contar con superficies que posean planitudes calibradas para realizar sobre ellas otros controles metrológicos tanto angulares como de perpendicularidad.

En cuanto a la redondez y la cilindricidad, su evaluación ha variado mucho en los últimos años y los métodos tradicionales fundamentados en la utilización de sistemas de medida o de verificación, que poseían un carácter intrínseco en relación con la pieza, han dado paso a la utilización de máquinas medidoras, de forma que constituyen una alternativa más eficiente en la determinación de estos parámetros en los componentes fabricados.

A continuación, se define cada una de las formas:

La condición de forma **redondez**: implica que cualquier línea de circunferencia debe estar contenida dentro de la zona de tolerancia preestablecida, que está

formada por dos círculos concéntricos cuya diferencia radial es (t) el valor de la tolerancia.

La condición de forma **rectitud**: implica que cualquier línea sobre una superficie debe hallarse dentro de la zona de tolerancia formada entre dos líneas paralelas a una distancia (t) separada en la dirección especificada.

La condición de forma **planeidad**: implica que la superficie debe estar contenida dentro de la zona de tolerancia formada entre dos planos paralelos a una distancia separada por (t) el valor de la tolerancia.

La condición de forma **cilindricidad**: implica que la superficie debe estar contenida dentro de la zona de tolerancia formada entre dos cilindros coaxiales con una diferencia entre radios (t) valor de la tolerancia.

La condición de forma **concentricidad**: implica que el punto central debe estar contenido dentro de la zona de tolerancia formada por un círculo de diámetro (t) concéntrico con la referencia.

La condición de forma **coaxialidad**: implica que el eje debe estar contenido dentro de la zona de tolerancia formada por un círculo de diámetro (t) concéntrico con la referencia.

La condición de forma **perpendicularidad**: implica que la línea debe estar contenida dentro de la zona de tolerancia formada entre dos planos a una distancia (t) separada y perpendicular a la referencia.

La condición de forma **desviación circular**: implica que la línea debe estar contenida dentro de la zona de tolerancia formada entre dos círculos, siendo ambos coplanares, pudiendo ser o no concéntricos a una distancia (t) separada concéntrica con o perpendicular a la referencia.

La condición de forma **desviación total**: implica que la superficie debe estar contenida dentro de la zona de tolerancia formada entre dos cilindros coaxiales con una diferencia en los radios de (t) o planos a una distancia (t) separada ya sea concéntricos o perpendiculares a la referencia.

3.2.2. Planitud

3.2.2.1. Mesas de planitud, mármoles de trazado y control

Las mesas de planitud o mármoles de trazado y control son superficies planas que pueden tener diferentes formas: cuadradas, rectangulares o circulares. Sus

dimensiones son también variables y pueden estar fabricadas en diferentes materiales tales como granito, acero o fundición gris. Su calidad o grado de precisión también es variable. Aunque continúan denominándose mármoles, se desaconseja el empleo de esta denominación y es preferible utilizar la de mesas de planitud.

Las mesas de planitud se utilizan como patrón de planitud o plano ideal en el trazado de piezas y en las verificaciones, controles, controles de superficies planas en ejecución, etc.

Las mesas de planitud deben llevar marcado su grado de precisión y la norma de referencia como mínimo para poder ser consideradas como tales. A continuación, en la Tabla 6, se exponen las posibles dimensiones y formas de mesas de planitud.

Mesas rectangulares y cuadradas		Mesas circulares	
	a × b	Diagonal	∅ a
1	100 × 100	189	100
	160 × 100		160
	160 × 160		200
2	250 × 160	297	250
	250 × 250		315
	315 × 200		
3	400 × 250	472	400
	400 × 315		
4	400 × 400	566	500
	500 × 315		
	500 × 500		
5	630 × 400	746	630
6	630 × 630	891	800
	800 × 500		
7	1 000 × 630	1 182	1 000
	1 000 × 800		
8	1 000 × 1 000	1 414	1 250
	1 250 × 800		
9	1 600 × 1 000	1 887	1 600
	1 600 × 1 600		
10	2 000 × 1 000	2 236	2 000
	2 000 × 1 250		
	2 000 × 1 600		
	2 000 × 2 000		
11	2 500 × 1 600	2 967	2 500

Tabla 6. Dimensiones de las mesas de planitud para las distintas formas.

La norma española sobre mesas de planitud es la norma UNE 82-309-85.

Mesas de planitud en fundición

Este tipo de mesas de planitud no alcanza grandes calidades, están realizadas en fundición perlítica generalmente, que es resistente al desgaste. En su parte inferior van provistas de nervaduras muy robustas a fin de proporcionarles un buen momento de inercia que les permita conservar la mayor rigidez. También van provistas de tornillos de reglaje.

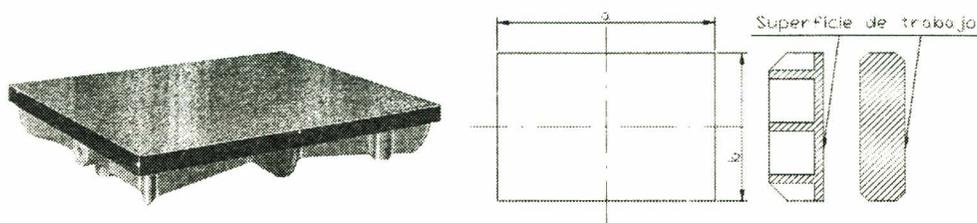


Figura 24. Mesa de planitud de fundición, (Mitutoyo) y vistas.

El espesor de las mesas de planitud no está normalizado. La posición, la forma y el número de nervaduras en las mesas de fundición se dejan a la iniciativa del fabricante, siendo el fin buscado lograr la rigidez y así evitar deformaciones. Para las mesas nervadas, la flecha bajo carga solo puede conocerse por métodos experimentales.

Las mesas deben estar en apoyo isostático sobre tres puntos como muestra, a continuación, la Figura 25.

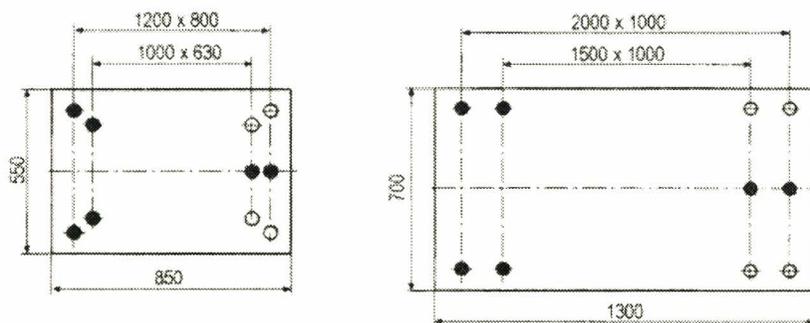


Figura 25. Tipos de apoyos isostáticos para mesas de planitud.

Las mesas de fundición deben estar en equilibrio térmico, y se recomienda al fabricante precisar el tiempo en el que la mesa alcanza dicho equilibrio.

Deben colocarse en una atmósfera tan estable como sea posible, libre de corrientes de aire y de fuentes de calor.

Mesas de planitud de granito

Con este tipo de material, el granito negro o diabasa, se pueden conseguir calidades superiores a las que se logran utilizando fundición como material constructivo. Este material posee, además, grandes ventajas, ya que no se ve afectado por la corrosión, no está expuesto a la oxidación y, por lo tanto, su limpieza y mantenimiento son muy sencillos. Además, su dureza es muy superior a la del acero de herramientas y su rigidez muy elevada.

Las mesas de planitud de granito deben mantenerse en equilibrio térmico e higrométrico.

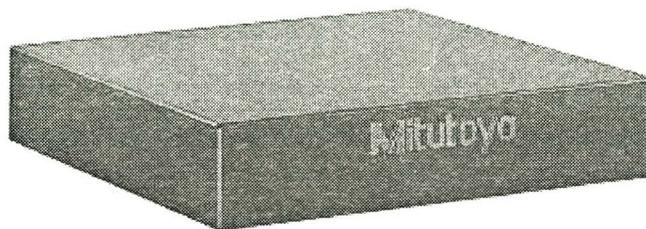


Figura 26. Mesa de planitud de granito. (Mitutoyo).

Tolerancias en las mesas de planitud

La tolerancia de planitud de una superficie se define como la distancia entre dos planos paralelos entre los cuales se encuentran todos los puntos de la misma.

Existen dos tipos de tolerancia de planitud a considerar: la tolerancia total de planitud (T_T) y la tolerancia local de planitud (T_L).

(T_T): implica que toda la superficie de trabajo de la mesa debe estar comprendida en los valores de planitud especificados en la Tabla 7.

(T_L), para aquellas mesas en las que la dimensión (a) sea superior a 400 mm, implica que cualquier zona cuadrada de 200 mm de lado de la superficie de trabajo debe estar comprendida en los valores indicados en la Tabla 8.

Tamaño de la mesa (mm)	Calidades					
	000	00	0	I	II	III
100	1.5	3.0	5.5	11.0	22.0	44.0
160	1.5	3.0	6.0	12.0	23.0	46.0
250	1.5	3.0	6.5	13.0	25.0	50.0
315	1.5	3.5	6.5	13.0	26.0	53.0
400	2.0	3.5	7.0	14.0	28.0	56.0
500	2.0	4.0	7.5	15.0	30.0	60.0
630	2.0	4.0	8.0	16.0	33.0	65.0
800	2.5	4.5	9.0	18.0	36.0	72.0
1 000	2.5	5.0	10.	20.0	40.0	80.0
1 250	3.0	5.5	11.0	23.0	45.0	90.0
1 600	3.5	6.5	13.0	26.0	52.0	104.0
2 000	4.0	7.5	15.0	30.0	60.0	120.0
2 500	4.5	9.0	17.5	35.0	70.0	140.0

Tabla 7. Tolerancias de planitud total T_T en (μm) para las distintas calidades y tamaños de mesas de planitud.

Tamaño de la mesa (mm)	Calidades					
	000	00	0	I	II	III
> 400	0.5	1.0	1.5	3.0	6.0	12.0

Tabla 8. Tolerancias de planitud local T_L en (μm) para las distintas calidades de mesas de planitud.

3.2.2.2. Proceso de calibración para mesas de planitud

Las mesas de planitud deben ser calibradas en el momento de la recepción y posteriormente con la periodicidad que se establezca en cada caso en el Plan de Calibración.

Los intervalos de calibración dependerán de la calidad de la mesa, de su resistencia al desgaste y de las condiciones y frecuencia de uso. No obstante, los establecidos son los siguientes en función del tipo de uso:

- Utilización en talleres y centros de inspección: de 6 a 12 meses.
- Utilización en laboratorios de metrología: de 12 a 24 meses.

Antes de proceder a la calibración se realizará una buena limpieza de la superficie de trabajo y será necesario asegurarse de que la mesa se encuentra en equilibrio térmico con el medio ambiente que la rodea, si es de fundición o acero y, además, en equilibrio higrométrico si se trata de una mesa de granito.

Se entiende que todos los datos referentes a la calibración se refieren a las condiciones habituales de medida:

- Temperatura de referencia: $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$
- Humedad relativa: $(50 \pm 5) \%$

En cuanto a los instrumentos de medida aplicables para calibrar una mesa de planitud son los referidos en la Tabla 9.

NOMBRE Y NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN SCI	DIVISIÓN DE ESCALA	
1. Regla (06.01) y comparador (03.01)	0.01	0.001 mm
2. Palanca con comparador (06.60)	0.01	0.001 mm
3. Base con comparador (mesas pequeñas)	0.01	0.001 mm
4. Regla óptica (06.08)		0.001 mm
5. Nivel de burbuja (05.04)	2 - 1" \Leftrightarrow	10 - 5 $\mu\text{m}/\text{m}$
6. Nivel electrónico	1" \Leftrightarrow	5 $\mu\text{m}/\text{m}$
7. Autocolimador con espejo (05.05)	1" \Leftrightarrow	5 $\mu\text{m}/\text{m}$
8. Sistema láser de medida (planitud)		0.1 μm

Tabla 9. Diferentes métodos para la calibración de mesas de planitud.

Los procesos de calibración de mesas de planitud son D-003 y D-06.05 en (SCI).

En términos generales, podemos decir que los métodos 1, 2, 3 y 4 a los que se refiere la Tabla 9 son de aplicación para las calidades inferiores, mientras que los métodos 5, 6, 7 y 8 son recomendables para todas las calidades.

En la calibración de una mesa de planitud, uno de los objetivos a conseguir es la evaluación de las desviaciones o defectos de planitud de la misma. Esta evaluación tiene como principal objetivo establecer la distancia entre el punto más elevado de la superficie de trabajo y el más profundo. De la diferencia entre la cota del punto más elevado respecto a la del punto más profundo se obtiene la desviación total de la planitud (D_T). Comparando este valor con la tolerancia total (T_T),

se obtiene la calidad de la mesa, en el caso de que no fuera conocida, o la calidad actual, en el caso de que esta hubiera cambiado debido al uso o envejecimiento.

Si se realiza además un mapa de desviaciones, entonces es posible apreciar la zona en la que se producen mayores diferencias locales, que pueden estudiarse para obtener la desviación local (D_L), valor este que se comparará con la tolerancia local (T_L).

Posibles formas de operar

Para proceder al estudio de las desviaciones de planitud se pueden emplear dos métodos:

- Método de exploración aleatoria.
- Método de exploración por entramado.

El método de exploración aleatoria se realiza bien mediante palanca con comparador o con comparador sobre base. Es de utilidad cuando se desea observar de una forma rápida y sencilla el estado de la superficie de trabajo de la mesa. No es muy preciso y solo es recomendable para mesas de pequeñas dimensiones. Por supuesto este método no sirve para calibrar la mesa y solo nos permite obtener una idea aproximada sobre el estado general de dicha superficie de trabajo, e incluso descartar la calibración si las desviaciones halladas superasen los valores de la (T_T).

El método de exploración por entramado se realiza trazando con un lápiz blando sobre la superficie de trabajo de la mesa una retícula cuyos puntos de intersección serán aquellos en los que se determinan las cotas. La distancia entre líneas de la retícula será igual a la distancia entre apoyos de la base del elemento de medida.

El número de tramos en cada lado debe ser el mayor posible y siempre par, a fin de que se pueda materializar el punto central en uno de medida.

A partir de todas las cotas evaluadas se elaboran las distintas líneas de perfiles de la mesa y finalmente es posible disponer de un mapa de líneas o curvas de nivel que aportará una visión intuitiva del estado de la superficie de trabajo.

Fórmulas para el cálculo de la tolerancia de planitud

Las siguientes fórmulas se proporcionan a título informativo, ya que solo se deben tener en cuenta los valores normalizados que aparecen en la Tabla 7 y en la Tabla 8.

CALIDADES	TOLERANCIAS DE PLANITUD
000	$T_T = 1.25 \left(1 + \frac{a}{1000}\right)$
00	$T_T = 2.50 \left(1 + \frac{a}{1000}\right)$
0	$T_T = 5.00 \left(1 + \frac{a}{1000}\right)$
I	$T_T = 10 + \frac{a}{100}$
II	$T_T = 20 + \frac{a}{50}$
III	$T_T = 40 + \frac{a}{25}$

Tabla 10. Expresiones de las tolerancias de planitud para las distintas calidades.

Los valores de la Tabla 7 y la Tabla 8 referidas a (20 °C) se obtienen a partir de las fórmulas indicadas mediante redondeo a la (0.5 μm) más próxima en las calidades 000, 00 y 0, y redondeo a la (1 μm) en las calidades I, II y III.

Sobre mesas de planitud consultar UNE 82 309-1.

3.2.2.3. Procedimiento de calibración mediante regla de control y reloj comparador

Como se ha mencionado la calibración de las mesas de planitud puede realizarse por diferentes sistemas. Aquí se explica el método 1 de la Tabla 10, adecuado para mesas de fundición de la calidad más baja y de reducidas dimensiones por ser muy frecuentes en los talleres.

Se dispone la regla de control sobre dos bloques patrón de la misma altura colocadas lo más próximo que sea posible al extremo de la superficie de la mesa. Sobre ella se sitúa un soporte guía al que se le adosa un reloj comparador. Una vez realizada la instalación, se procede al desplazamiento del comparador tomando las cotas de los puntos de interferencia de la retícula, habiendo tomado anteriormente un punto arbitrario de la misma al que se le otorga el valor cero. Con respecto a la cota de dicho punto, tomado como cero, se referirán las restantes, cuyos valores se irán pasando a los gráficos, y permitirán conocer el

estado de la superficie y comprobar la Desviación Total (D_T) medida, que debe ser menor o igual que la Tolerancia total (T_T), y si fuera el caso en función de las dimensiones de la mesa, también que la Desviación Local (D_L) es menor o igual que la Tolerancia Local (T_L).

Mapas de perfiles

Se analizan las diferentes líneas b, c, d, e, f, g, del entramado. Con ellas se consigue hallar la curva media de valores, que se complementa con un mapa de líneas de nivel, lo que proporciona una perspectiva del estado de planitud de la mesa.

Línea b

+8													
+7													
+6													
+5													
+4													
+3													
+2													
+1													
0													b
-1													
-2													
-3													
-4													
-5													
-6													
-7													
-8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	

Curva media de valores

+8													
+7													
+6													
+5													
+4													
+3													
+2													
+1													
0													Media
-1													
-2													
-3													
-4													
-5													
-6													
-7													
-8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	

Mapa de líneas de nivel

a													
b													
c													
d													
e													
f													
g													
h													
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	

Los resultados de la calibración de una mesa de planitud deberán reflejar:

- Descripción del método utilizado.

- Referencia empleada.
- Desviación de Planitud Total.
- Desviación de Planitud Local si uno de los lados de la mesa es superior a (400 mm).
- Incertidumbre estimada para la desviación total.
- Incertidumbre estimada para la desviación local.
- Mapa de desviaciones de planitud con sus cotas.
- Incertidumbre media de las cotas.
- Instrumento empleado.
- Temperatura y humedad.
- Descripción de la base de apoyo.
- Ubicación.
- Rigidez y carga máxima de la mesa.
- Observaciones que puedan resultar de interés.

3.2.3. Rectitud

Uno de los problemas más usuales en metrología de formas consiste en verificar la rectitud en componentes de maquinaria y mecanismos.

Cuando la rectitud se verifica sobre pequeñas distancias, de unos (500 mm) como máximo, y en piezas cuyo peso no sea muy elevado, hasta unos (30 kg), se pueden obtener elevadas precisiones por medida directa en un laboratorio, utilizando una medidora por coordenadas, una medidora con comparador electrónico o un sistema láser para la medida de los desplazamientos. Con cualquiera de estos medios se puede lograr una verificación de calidad con medidas punto a punto a intervalos a elegir o bien mediante un registro continuo. Pero cuando las longitudes a verificar son mayores y las piezas más grandes o pesadas, como ocurre con las guías de desplazamiento de máquinas, debemos emplear instrumentos de metrología portátiles, que permitan trabajar en los centros de fabricación. Los métodos más empleados son los siguientes:

Método de medida	Procedimiento
Medida directa	Anteojo con mira Regla óptica
Medida indirecta	Palanca con comparador Niveles de burbuja o electrónicos Autocolimador con espejo Interferómetro láser

Tabla 11. Métodos de control de la rectitud.

3.2.4. Niveles de burbuja

Los niveles de burbuja o de aire son instrumentos ampliamente utilizados para la determinación de planos horizontales o bien para la medición de los ángulos que forman planos o rectas con el plano horizontal. En metrología se utilizan niveles de burbuja de precisión. El nivel de burbuja fue inventado en Francia por Melchisedech Thevenot, hacia 1661, sin embargo, los niveles con el aspecto actual son relativamente recientes. Lo creó Henry Ziemann, de Empire Level Manufacturing Corporation, en 1920. Estos instrumentos constan de un tubo o ampolla tórica que presenta una curvatura conocida y en la que se introduce un líquido muy fluido, éter o alcohol, que la llena, aunque no completamente, pues se deja una burbuja de aire que asciende a la superficie, pudiendo considerarse basado en el principio de Arquímedes. Dicha ampolla está sellada por sus extremos y provista de unos trazos de referencia que nos permiten controlar la posición que ocupa la burbuja de aire respecto a ellos. Sobre niveles, puede consultar la UNE 82-308-95.

La ampolla va montada rígidamente en un tubo metálico provisto de una apertura longitudinal que nos permite observar los desplazamientos de la burbuja. Este conjunto puede ir montado de forma rígida o graduable sobre un soporte o base, lo que da lugar a distintos tipos de niveles.

Además de la ampolla principal, los niveles disponen de una ampolla auxiliar situada perpendicularmente a la principal, cuyo objeto es la comprobación previa a la nivelación de que el instrumento se encuentra nivelado en sentido transversal, lo cual es necesario comprobar previamente para la correcta utilización del nivel. La sensibilidad de la ampolla auxiliar es bastante inferior a la de la principal, del orden de 8 veces menos.

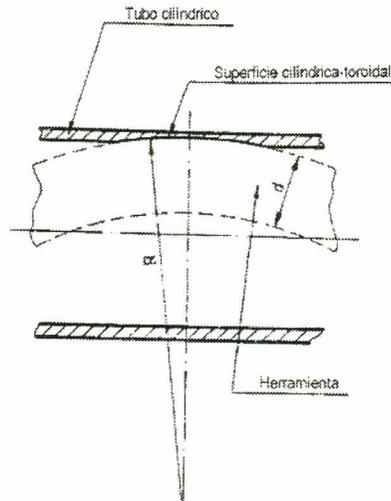


Figura 27. Burbuja de un nivel.

La ampolla va montada rígidamente en un tubo metálico provisto de una apertura longitudinal que nos permite observar los desplazamientos de la burbuja. Este conjunto puede ir montado de forma rígida o graduable sobre un soporte o base, lo que da lugar a distintos tipos de niveles.

Además de la ampolla principal, los niveles disponen de una ampolla auxiliar situada perpendicularmente a la principal, cuyo objeto es la comprobación previa a la nivelación de que el instrumento se encuentra nivelado en sentido transversal, lo cual es necesario comprobar previamente para la correcta utilización del nivel. La sensibilidad de la ampolla auxiliar es bastante inferior a la de la principal, del orden de 8 veces menos.

En cualquier caso, la oscilación de la burbuja y su lenta estabilización son indicativos de la alta sensibilidad de un nivel.

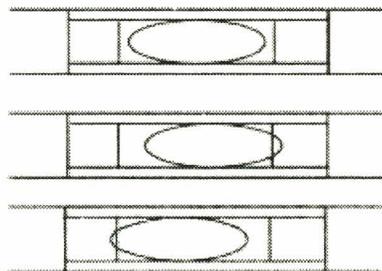


Figura 28. Posiciones de la burbuja de un nivel.

Características de un nivel

La sensibilidad aparente de un nivel es la variación de pendiente por metro, al desplazarse la burbuja el espacio que va de una división a la otra, de la graduación de la ampolla. Conviene tener en cuenta que el centrado de la burbuja como marcador del cero conlleva cierta indeterminación.

Los niveles de mayor precisión, que se emplean para la verificación de la planitud de las guías de máquinas-herramientas, poseen sensibilidades del orden de (0.02 mm por metro), distando entre sí los trazos de la ampolla (2 mm), distancia establecida por la norma.

La figura permite calcular el radio de curvatura de la ampolla de un nivel, por semejanza entre los triángulos $O\hat{A}B$ y $O'A'B'$ lo que permite escribir:

$$\frac{R}{L} = \frac{l}{h}$$

Para $l = 2 \text{ mm}$, $h = 0.02 \text{ mm}$ y $L = 1 \text{ m}$, se deduce $R = 100 \text{ m}$, siendo (R) el parámetro denominado **relación de amplificación del nivel**.

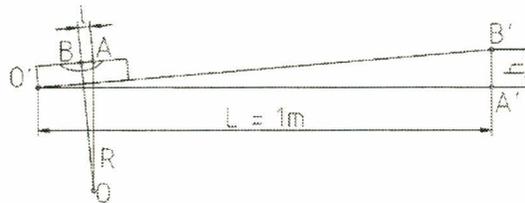


Figura 29. Relaciones de semejanza que permiten el cálculo del radio de curvatura de la ampolla.

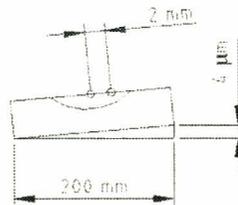


Figura 30. Datos para el cálculo de la sensibilidad del nivel.

La relación (R/L) es la relación de amplificación del nivel, para el caso de la figura, dicha relación vale 100.

La sensibilidad del nivel puede definirse también en función del valor (h) correspondiente al desplazamiento de una división de la burbuja para una

longitud igual a la base del nivel. Para el nivel anterior, suponiendo una base de (200 mm) de longitud, (h) será:

$$h = (0.02 \times 200)/1\ 000 = 0.004\ \text{mm}$$

Esta relación permite el cálculo de la desnivelación relativa entre los dos extremos del nivel para un desplazamiento dado de la burbuja.

Se observa que un nivel es tanto más sensible cuanto mayor sea (R), pero tal sensibilidad se ve alterada por las variaciones de temperatura y también por el proceso de degradación al que está sometido el vidrio.

Histéresis de un nivel

Se denomina histéresis en metrología al fenómeno que algunos instrumentos presentan consistente en la descompensación o diferencia existente en la medida que arrojan, dependiendo de que esta se produzca en sentido ascendente o descendente. La histéresis de forma intuitiva puede interpretarse como una cierta inercia o resistencia a modificar un estado previo. En este caso la inercia se refleja en la posición de la burbuja cuando la posición del plano se ha modificado, y esa descompensación depende de que la posición anterior fuese ascendente o, por el contrario, descendente.

Se parte de un nivel situado sobre un plano (AB) y su burbuja sobre la graduación (t), según muestra la Figura 31. Si se eleva la cota derecha del nivel con suavidad hasta la pendiente (AC), se observa que la burbuja se desplazará hacia la derecha. Si se desciende de nuevo con el nivel, se observa que para que la burbuja vuelva a la posición inicial (t) se ha de llegar hasta la pendiente (AD) rebasando la pendiente inicial (AB).

La cota (BD) expresada en (μm) por metro o en segundos de arco, 1 segundo de arco equivale a una pendiente de ($5\mu\text{m}/\text{m}$), lo que proporciona la histéresis del nivel, que es una inercia de la burbuja debida a su adherencia a las paredes del tubo, a la viscosidad del líquido en él contenido y al propio estado del vidrio.

Los niveles de gran precisión han de poseer histéresis inferiores a ($2\ \mu\text{m}/\text{m}$), mientras que, para los niveles de calidad, se sitúa entre 6 y 10 ($\mu\text{m}/\text{m}$).

La histéresis de un nivel es una característica que varía a lo largo del tiempo debido al inevitable envejecimiento de la ampolla y también a las malas condiciones de uso y de almacenamiento.

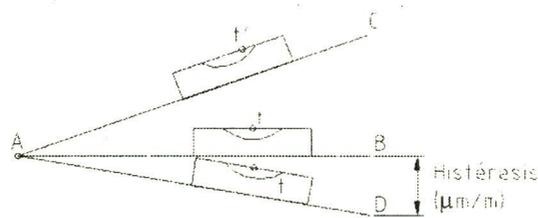


Figura 31. Representación de la histéresis de un nivel.

Influencia de la temperatura en los niveles

Los niveles son muy sensibles a los cambios de temperatura, especialmente si las variaciones son grandes. Debido a ello, pueden producirse deformaciones tanto en la ampolla como en la montura, además de experimentar variaciones la propia longitud de la burbuja. Por tanto, para medidas de precisión conviene operar en atmósferas isotérmicas y, por supuesto, no dejar nunca los niveles expuestos a fuentes de calor.

Velocidad de retorno de la burbuja

El tiempo de retorno de la burbuja a su anterior posición depende de los siguientes factores:

- El radio de curvatura de la ampolla.
- La densidad del líquido y su viscosidad.
- El estado del vidrio.

En los niveles de alta sensibilidad el tiempo de estabilización de la burbuja es elevado, por lo que la operación de nivelación es lenta.

3.2.4.1. Clasificación de los niveles

Existen diferentes tipos de niveles pudiendo clasificarse en función de los siguientes factores:

Por el montaje del tubo que contiene la burbuja

- Caja solidaria o no regulable.
- Regulable o de caja independiente, tipo clinómetro.

Por el sistema de observación de la burbuja

- De lectura directa.

- De coincidencia.

Por la forma del cuerpo del nivel

- Rectos.
- Circulares.
- En escuadra.
- De cuadro.
- Cruzados.

Por la forma de su base

- Planos.
- En «V».
- Continuos.
- Discontinuos.

Las superficies de apoyo prismáticas y rectificadas se adaptan muy bien a las espigas de cigüeñal que son elementos habituales a controlar con este instrumento.

Por su campo de aplicación

- De nivelación u horizontabilidad.
- De medición de ángulo.

Por su tipo de funcionamiento

- De tubos comunicantes.
- De burbuja.
- Electrónicos.
- Niveles digitales.
- Ópticos.
- Láser.

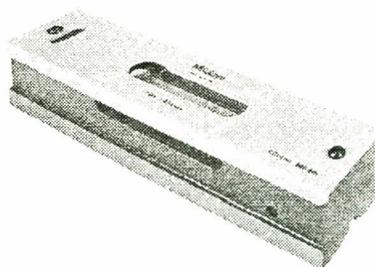


Figura 32. Nivel de burbuja de base prismática. (Mitutoyo).

3.2.4.2. Empleo del nivel de burbuja

Es importante precisar que el cero, marcador de la posición «horizontal» de un nivel, es decir, la división que coincide con un lado de la burbuja, cuando la base de apoyo del nivel es horizontal, es indeterminado. Su posición solo es válida para un período de tiempo corto, ya que varía con la dilatación de la burbuja, bajo la acción de los cambios de temperatura, y según la histéresis del instrumento. Si bien, por otra parte, no es necesario conocer este cero horizontal para utilizar el nivel, pues el nivel debe utilizarse más racionalmente como comparador de pendiente. Téngase en cuenta que el campo de medida de un nivel de sensibilidad (0.02 mm/m), que se obtiene al multiplicar dicha sensibilidad por el número de trazos existentes en la ampolla (8), proporciona el siguiente resultado:

- Campo de medida = $0.02 \text{ mm/m} \times 8 = 0.16 \text{ mm/m}$, que equivalen a $33''$ de arco de ángulo.

Sin embargo, se indicará más adelante cómo se puede determinar el cero horizontal de un nivel.

Como índice se utiliza un solo lado de la burbuja, y siempre el mismo: el lado derecho; y para las medidas, el nivel se desplaza de izquierda a derecha. De esta forma, si las lecturas aumentan cuando el nivel se desplaza hacia la derecha, ello indica que la superficie verificada es cóncava; en caso contrario, es convexa.

El desplazamiento del nivel sobre la superficie a verificar debe hacerse según una dirección definida y muy paralelamente a esta dirección, para evitar la influencia de una posible pendiente transversal; para las medidas de precisión, se recomienda colocar dos topes-guía laterales.

En la práctica, para verificar la planitud de una superficie, se realizan una serie de medidas de «ida», de izquierda a derecha, y una serie de medidas de «vuelta»,

de derecha a izquierda, y se toma la media de las lecturas correspondientes a ambas. Esto permite reducir la influencia de las variaciones de temperatura y del posible asiento de los apoyos del nivel.

Determinación del cero de un nivel

De acuerdo con lo expresado anteriormente, el cero de un nivel es la división coincidente con el lado derecho de la burbuja cuando la base es horizontal. Su determinación se hace por inversión, no necesitándose un plano horizontal.

Verificación de una horizontalidad con el nivel

Dada la indeterminación del cero en un nivel de burbuja, es preciso operar por inversión, en este caso, después de realizar una inversión alrededor de (yy') el lado índice de la burbuja debe marcar la misma división en las dos posiciones, si la superficie es horizontal, puesto que la burbuja no se ha movido.

Según lo que precede, si existiera una diferencia o desviación respecto a la horizontal, el nivel indica el doble.

Como comparador de pendiente, el nivel puede emplearse de la siguiente manera: por la medida de los desplazamientos de las burbujas, y teniendo en cuenta la constante del nivel, se determinan las desnivelaciones sucesivas de los dos apoyos de base por el método de las pendientes. Esta operativa es aplicable a los niveles de regulación fija; es el más directo, pero puede caer en defecto si la superficie a verificar se aleja de tal forma de la horizontal que la burbuja se sale de los límites de la división.

3.2.4.3. Nivel con tornillo micrométrico

En este tipo de niveles, el plano de la ampolla puede inclinarse con respecto a la horizontal mientras la base del nivel permanece en posición horizontal. Por lo tanto, se trata de un nivel de montaje graduable y está dotado de un tornillo micrométrico de medición.

Este tipo de nivel permite medir con facilidad pendientes y presenta la gran ventaja de proporcionar directamente el desnivel entre sus extremos de apoyo. Como desventaja cabe citar que el proceso de medición con él es lento y además a la incertidumbre del nivel se añade la del micrómetro.

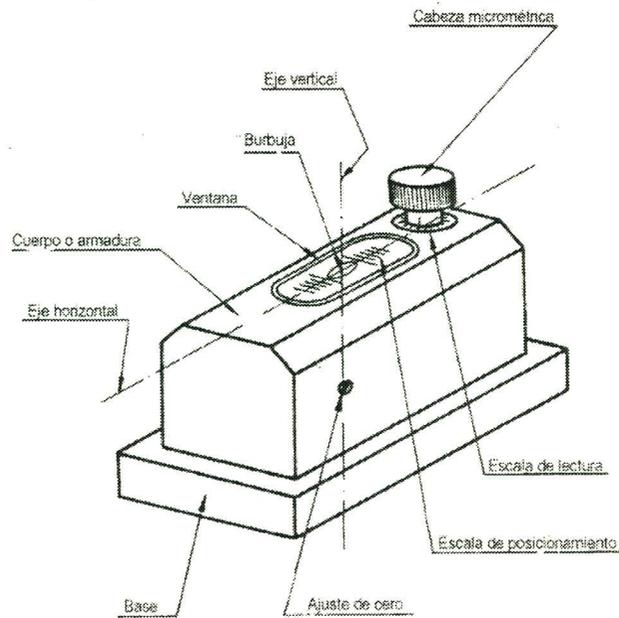


Figura 33. Nivel con tornillo micrométrico.

Para obtener dicho valor se realizan los siguientes pasos:

- Se centra la burbuja sobre un plano horizontal, con ayuda de una mesa de planitud.
- Se coloca el nivel sobre el plano, cuya pendiente queremos obtener, con lo que la burbuja se desviará.

Entonces con la ayuda del tornillo micrométrico se mueve la burbuja hasta lograr centrarla.

$$Tg(\alpha) = \frac{S}{1000} N$$

Siendo (S) la sensibilidad del nivel y (N) el número de divisiones del tornillo que ha sido preciso girar para lograr la nivelación de la burbuja en esa posición. Una vez obtenida la tangente, se puede determinar el valor del ángulo que forma el plano inclinado con respecto a la horizontal.

3.2.4.4. Clinómetro

Este instrumento está constituido por un nivel de burbuja cuya ampolla se mueve independientemente de la caja que conforma el cuerpo del instrumento, montaje

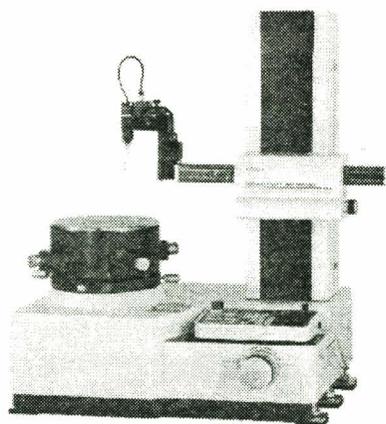


Figura 36. Máquina de control de forma. (Mitutoyo).

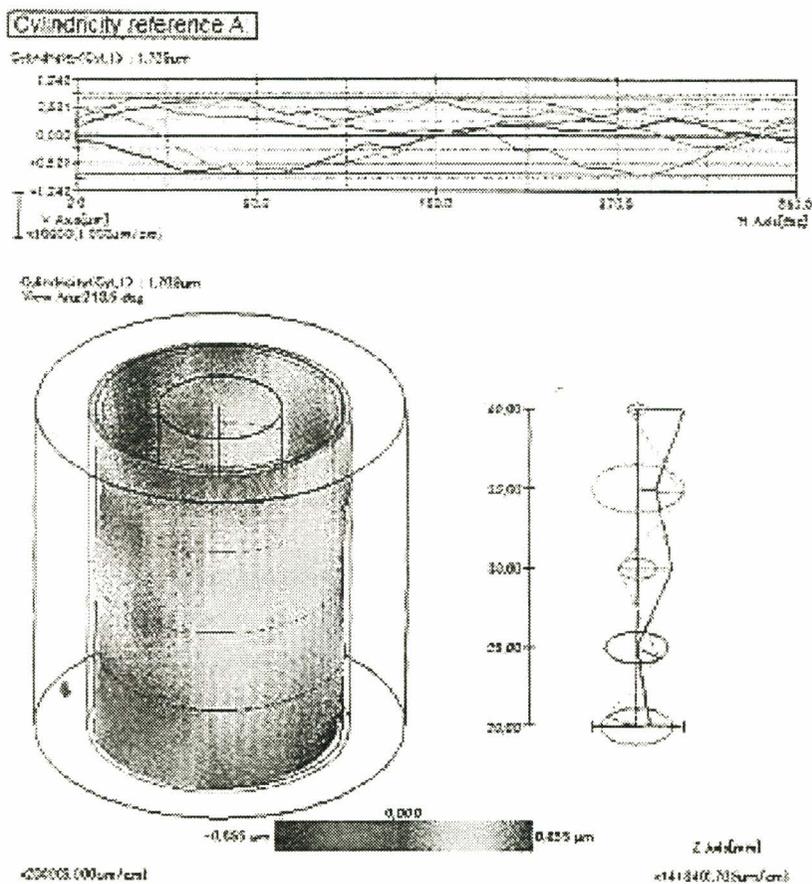


Figura 37. Resultado del control de forma en una máquina medidora. (Mitutoyo).

En cuanto a la medición de la redondez, en la actualidad existen 4 sistemas diferentes para la definición de centro:

- Sistema del centro del mínimo círculo circunscrito (CC).
- Sistema del centro del máximo círculo inscrito (CI).
- Sistema del centro de zona mínima (ZM).
- Sistema del centro de mínimos cuadrados (MC).

Consultar UNE 82-307-194 y UNE 82 320, 1995.

La diferencia básica entre la máquina medidora de forma (MMF) y la máquina medidora de redondez (MMR) radica en lo siguiente:

La máquina medidora de forma posee un movimiento automático rectilíneo y perpendicular al plano de giro y sus registros gráficos son de tipo lineal. Puede cuantificar cilindridad y redondez.

La máquina medidora de redondez posee solo un movimiento automático que corresponde al giro pieza-palpador. Los registros gráficos son de tipo polar.

3.2.6. Medición dimensional sin contacto

Los sistemas de medición basados en la alineación óptica agrupan a una serie de instrumentos y técnicas que tienen por objeto efectuar todo tipo de verificaciones geométricas tales como rectitud, planitud, paralelismo, perpendicularidad, nivelación, etc., y que son aplicables tanto a piezas industriales como a componentes metálicos de gran tamaño. La instrumentación que podemos citar dentro de este apartado es la siguiente:

- Nivel óptico.
- Telescopio o anteojo de alineación.
- Autocolimador.
- Teodolito industrial.
- *Transit level*.
- Equipo láser.

De este grupo de instrumentos, se describirán el autocolimador y el interferómetro.

3.2.6.1. Autocolimador

El autocolimador es un instrumento que utiliza la luz para la medición de los ángulos. Su funcionamiento se basa en proyectar una luz «colimada», es decir, de haces paralelos a través de un objetivo sobre un objeto con una luz reflectiva.

Cuando la superficie a controlar es perpendicular a la luz proyectada, el haz es reflejado de retorno a su punto de origen. Pero si la superficie está inclinada con respecto al eje óptico del colimador, entonces la luz reflejada se desplaza y ese desplazamiento se visualiza sobre una cuadrícula, generalmente una línea en cruz.

Cualquier desviación existente entre la luz proyectada y el haz reflejado se mide contra la escala en arcosegundos. El arcosegundo es un sexagésimo de un arcominuto, que a su vez equivale a un sexagésimo ($1/60$ de grado) o ($\text{pie}/18\ 000$ radianes).

Los autocolimadores pueden utilizar la detección visual o digital empleando para ello un fotodetector.

La técnica de autocolimación emplea pues el autocolimador y un espejo de referencia, de forma que las variaciones angulares de dicho espejo son leídas en el autocolimador y las variaciones de angularidad del espejo son debidas a los errores de rectitud de la superficie donde se apoya el espejo.

Partes de un autocolimador:

- Tubo cilíndrico.
- Fuente de luz infrarroja monocromática para las mediciones y fuente luminosa visible, generalmente amarilla en el ocular.
- Sistema micrométrico de lectura.
- Objetivo.
- Ocular.
- Retículo y matriz fotosensible.

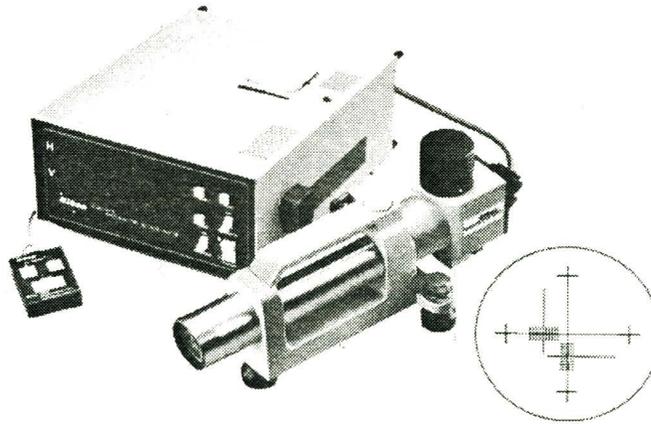


Figura 38. Autocolimador. (Mitutoyo).

Ejemplos de aplicación del autocolimador

El autocolimador puede utilizarse para comprobar la nivelación en estructuras metálicas durante el montaje y la rectitud de un perfil. Este sistema también resulta válido para conseguir la alineación de cualquier elemento sobre una mesa de planitud o comprobar la alineación de orificios o huecos en elementos de máquinas y motores. Así pues, los usos de los autocolimadores pueden ser los siguientes:

- Alineación de elementos mecánicos.
- Detección de un movimiento angular.
- Medición de ángulos con alta exactitud.
- Monitoreo angular para asegurar que no existen errores angulares en un sistema.
- Verificación de paralelismo, cuadratura, planitud, etc.

3.2.6.2. Proyector de perfiles

El proyector de perfiles, también denominado proyector de perfiles y sombras o proyector de perfiles opacos, es un instrumento de medición óptica auxiliar básico, que sirve como medidor de dimensiones y formas por amplificación óptica, para proyectar la imagen de un objeto sobre una pantalla, con un aumento o ampliación que puede ir desde 50 a 200 veces el tamaño de la pieza y que permite realizar la medición en una escala lineal o circular.

El proyector de perfiles se emplea cuando se desean realizar mediciones o bien observar detalles de pequeñas piezas o elementos que no se pueden medir con otro tipo de instrumentos, dado su tamaño, si se trata de un proyector vertical, y sirve también para la medición de piezas robustas y de mucho mayor tamaño cuando se trata de un proyector de perfiles horizontal.

El uso principal, o uno de los principales de este instrumento, es la identificación de un punto o borde en la sombra a partir del cual poder calcular la longitud. Al proporcionar amplificación el operador puede trabajar con mayor precisión tomando un punto o borde como partida para el cálculo.

Las dimensiones a medir pueden ser: radios muy pequeños, zonas con acabado en chaflán o cotas en zonas muy estrechas y situadas en ubicaciones a las que ni tan siquiera la punta de rubí del palpador de una máquina de medir por coordenadas (MMC) tiene acceso, y que puede ser medido si el proyector es vertical.

La medición realizada con un Proyector de Perfiles puede ser realizada directamente o bien estar dotado de una unidad de procesamiento asistida por *softwares* específicos que permiten la toma, almacenamiento y explotación de los datos sin necesidad de utilizar las cabezas micrométricas del proyector.

La iluminación que proporciona el proyector puede ser: horizontal, vertical ascendente o vertical descendente. Existen dos tipos de iluminación según el tipo de medición que se pretenda: la iluminación de contorno, que permite realizar mediciones al ampliar; y la iluminación de superficie, que también permite mediciones y comprobaciones del estado superficial. Ambas pueden emplearse simultáneamente. La iluminación sobre la superficie de la pieza se denomina iluminación por **reflexión o iluminación episcópica**. Proporciona relieve, con ella el haz luminoso incide sobre una cara plana y pulida de la pieza a medir, reflejando su imagen en la pantalla. Esta imagen se puede conseguir también por medio de un microscopio de medición de laboratorio incluso con mayor precisión. Por otro lado, la iluminación de contorno es la que se denomina iluminación por **proyección o iluminación diascópica**. Proporciona sombra, marca el perfil y es la que le da nombre al instrumento. El haz luminoso en este tipo de iluminación incide sobre la pieza proyectando su contorno aumentado sobre la pantalla. Este sistema, al poseer mayor precisión que el sistema de reflexión, más utilizado en microscopios, es la que más se utiliza en los proyectores de perfiles.

La imagen puede ser directa o invertida.

La imagen de un objeto proyectada sobre la pantalla es directa si está orientada de la misma forma en que lo está el objeto en el portaobjetos. Pero si está invertida de arriba abajo, de izquierda a derecha, se trata de lo que en óptica se denomina imagen inversa.

La imagen obtenida puede ser o bien una imagen de contorno, si se ha aplicado una **iluminación de contorno**, o bien una **iluminación coaxial** de la superficie, que ilumina la pieza por una luz transmitida coaxialmente a la lente contando con un semiespejo o una lente de proyección con semiespejo incorporado. La iluminación también puede ser **oblicua**, iluminando oblicuamente la superficie de la pieza de trabajo. Este método proporciona una imagen del contraste aumentado y permite la observación en tres dimensiones con claridad. Dependiendo de que el sistema de iluminación que se haya utilizado sea uno u otro tendremos diferentes tipos de imagen. El proyector de perfiles se complementa con una gran cantidad de plantillas de superposición traslúcidas, que son plantillas de referencia que permiten aumentar el rango de sus aplicaciones, así como la eficiencia del proyector, existiendo una gran variedad en función de lo que se desee medir y que permiten también comparar el borde del elemento que aparece amplificado en la pantalla con los de la plantilla que se superpone a la misma, transformando en realidad la medición en una comparación. Existen plantillas para roscas, engranajes, para control de radios, concentricidades, coordenadas, etc., ya que la utilidad principal del proyector es la medida de roscas, ángulos, pasos, diámetros, etc.

El proyector de perfiles permite realizar medidas directas por proyección y con las cabezas micrométricas se pueden realizar medidas longitudinales y también angulares con la pantalla giratoria.

En cuanto a la iluminación de contorno o iluminación diascópica, los proyectores de perfiles pueden ser horizontales o verticales.

Los proyectores de perfiles suelen utilizarse en talleres de tornería, en zonas de ensamblaje y en departamentos de control de calidad.

Proyector de perfiles de eje horizontal

En este tipo de proyector el haz luminoso incide sobre el mensurando horizontalmente y es adecuado para la medición de piezas robustas y grandes, de 1 m o aún mayores, que se sitúan sobre mesas de acero dotadas de ranuras y

elementos de fijación. Los dos ejes longitudinales de medida se denominan X y Z, mientras que el eje Y es el que se utiliza para el enfoque.

Proyector de perfiles de eje vertical

En este tipo de proyector el haz luminoso incide sobre el mensurando verticalmente. La pieza a medir se sitúa sobre una mesa de vidrio a través de la que se transmite el haz luminoso. Son instrumentos con campos de medida pequeños, de (0.2 a 0.3 m) como máximo por eje. Con este tipo de proyector se consigue mayor precisión que con el horizontal. Los dos ejes de medida longitudinales son (X) e (Y), mientras que (Z) es el eje que se utiliza para el enfoque.

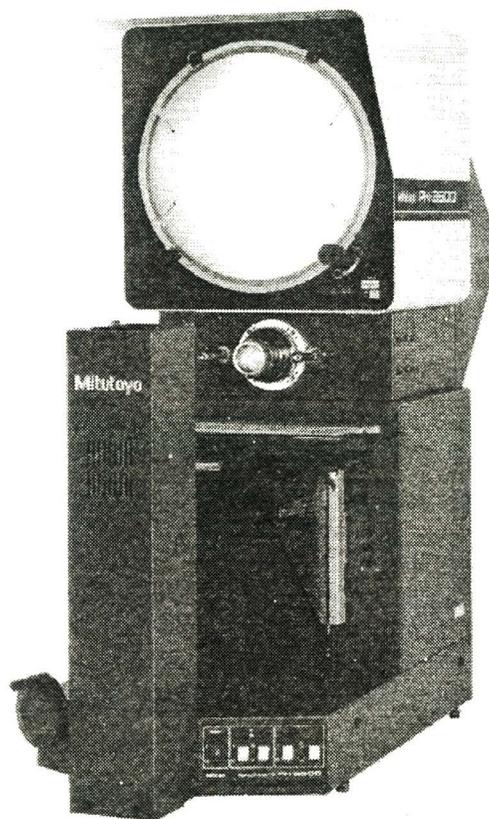


Figura 39. Proyector de perfiles. (Mitutoyo).

Partes de un proyector de perfiles

Pantalla principal: está provista de cuadrantes y dividida en grados, lleva un goniómetro incorporado y cuenta con lentes de aumento. Esta pantalla, dependiendo de sus dimensiones, determina el área del objeto que puede ser observado, aunque resulta práctica habitual ir desplazándolo para someterlo a observaciones parciales. El campo de visión de un proyector es igual a su diámetro dividido por la amplificación del proyector.

Mesa transversal: va provista de un micrómetro de precisión de 5 (μm). En realidad, la mesa soporte es la que define el campo de medida del proyector.

Iluminación diascópica: proyección por luz transmitida que proyecta la silueta o contorno de la pieza.

Iluminación episcópica: proyección por luz reflejada, muestra en la pantalla la imagen iluminada.

Ejes de medición: los proyectores, además de las escalas de medida longitudinales, poseen una pantalla giratoria dotada de una tercera escala angular.

Dispositivo electrónico de toma de datos

Precisión del aumento

La precisión del aumento de un proyector de perfiles para una lente determinada se calcula proyectando una imagen de un objeto y comparando el tamaño de la imagen de dicho objeto, tal y como se mide en la pantalla con el tamaño esperado, dependiendo del tamaño de la lente. En el caso del proyector debe tenerse en cuenta que la precisión del aumento no coincide con la precisión de la medición.

$$\Delta M(\%) = \frac{L - IM}{IM} \times 100$$

$\Delta M(\%)$: Precisión de aumento expresada como porcentaje.

L: longitud de la imagen proyectada del objeto de referencia medido en la pantalla.

I: longitud del objeto de referencia.

M: aumento de la lente de proyección.

Uso y mantenimiento

En un proyector de perfiles es importante realizar el correcto mantenimiento tal como recomienda el fabricante, lubricando las partes móviles y evitando engrasar las lentes y las piezas de vidrio. La limpieza de la óptica y las superficies de vidrio debe ser cuidadosa, evitando rayarlas.

El proyector debe estar situado en un lugar en el que no haya vibraciones, que, aunque no afectan al proyector directamente, si perturban la precisión de la medición.

También es importante mantener limpio el proyector y ubicarlo en un espacio libre de polvo y suciedad y que las piezas que se coloquen para ser medidas o verificadas estén también libres de polvo y suciedad.

La iluminación debe ser idónea para poder contemplar la pantalla, ya que una luz muy fuerte o inadecuada en la sala oscurece la pantalla dificultando la medición.

Mediciones

Las operaciones básicas con un proyector de perfiles pueden ser:

- Enrasar
- Alinear

Enrasar: consiste en lograr la coincidencia con gran precisión entre la línea o superficie extrema de una pieza o patrón y alguna de las líneas de la retícula de la pantalla de observación o de la plantilla auxiliar.

Alinear: consiste en colocar la pieza o patrón sobre la mesa de soporte del proyector de tal modo que las caras o aristas de referencia sean paralelas con gran precisión a la dirección del movimiento del eje para eliminar el error de coseno.

Con un proyector de perfiles se pueden medir diversos elementos de formas diferentes:

- Directamente sobre la pantalla, se mide con una regla de trazos la pieza a medir. Posteriormente es necesario realizar el cociente, siendo el dividendo el valor de la magnitud leída y el divisor la amplificación de la lente. El resultado será el valor del mensurando.

- Comprobando la imagen de la pieza en la pantalla con la plantilla traslúcida interpuesta para observar, por ejemplo, si se cumple una tolerancia, aunque son muchos los parámetros que se pueden comprobar por comparación dependiendo de la clase de mensurando que deseamos comparar y de la plantilla que se interponga.
- Enrasar uno de los ejes de la pantalla del proyector con un lado de la pieza y desplazar la mesa con una de las cabezas micrométricas hasta conseguir enrasar el eje con el otro lado de la pieza a medir. La lectura viene dada por el desplazamiento realizado con la cabeza micrométrica y tendrá, por tanto, precisión micrométrica.
- Cuando lo que se desea medir son magnitudes angulares, se alinea un vértice del ángulo a medir con uno de los ejes de la pantalla, se gira la pantalla hasta que se logre alinearla con el otro vértice del ángulo. La lectura, en este caso, se realiza sobre la escala graduada de la pantalla en grados, en la pantalla giratoria.
- Verificación de roscas por proyección. Se proyecta una imagen del perfil de la rosca a controlar o verificar. Se la compara con una plantilla superpuesta de roscas del mismo tipo y así se pueden medir los errores de forma, controlar la simetría del perfil y las características de la rosca. La rosca debe estar situada de forma que el eje óptico del proyector coincida con la hélice de la tangente, de tal forma que el perfil observado coincida con una sección del filete por un plano normal a la hélice media.

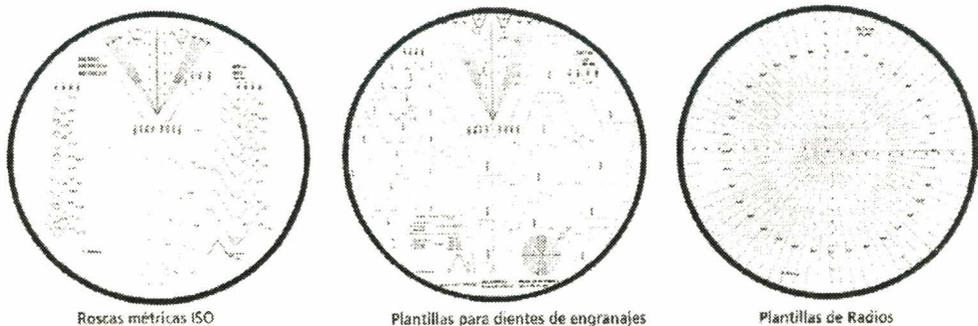


Figura 40. Algunas de las plantillas auxiliares que complementan al proyector de perfiles. (Mitutoyo).

Calibración del proyector de perfiles

La calibración de un proyector de perfiles es un proceso que abarca las siguientes partes o elementos de un proyector:

Iluminación diascópica

Calibración de los ejes de medida longitudinales.

Calibración de la escala de medida angular.

Iluminación episcópica

Calibración de los ejes de medida longitudinales.

Calibración de la escala de medida angular.

El resultado de estas calibraciones proporcionará las incertidumbres expandidas de calibración para el eje (X) e (Y). Para el cálculo de incertidumbres se utiliza la guía (*GUM*).

3.2.7. Formas primitivas y complejas

Las formas geométricas primitivas, por su básica constitución en las partes que las conforman, se conocen también como primitivas geométricas, cuyas formas son: círculo, triángulo y cuadrado.

Las primitivas geométricas en un *software* 3D pueden editarse para conseguir formas geométricas de mayor complejidad al agregarles nuevos vértices, aristas y polígonos.

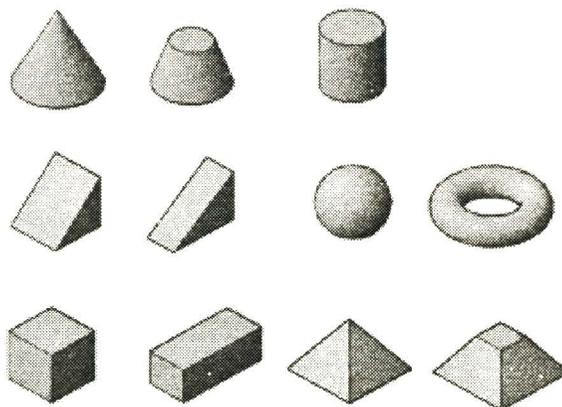


Figura 41. Formas geométricas primitivas

Formas complejas

Se denominan formas complejas a aquellas formas basadas en curvas *B-Spline*, *NURBS*. Las superficies complejas poseen infinidad de radios y no uno solo, tal como sucede en los elementos paramétricos. Antes de contar con ordenadores, ya era preciso modelar curvas y superficies de grandes dimensiones. En la industria naval existía un oficio, el del *lotfsman*, que diseñaba quillas y cascos. Dichas técnicas manuales se trasladaron a la naciente industria aeronáutica y también a la industria automotriz, ya que se precisaba contar con superficies que enlazasen unas con otras mediante transiciones suaves. Las herramientas de un *lotfsman* eran varillas largas y flexibles que se podían curvar y se denominaban *splines*. Los *splines* se mantenían en sus posiciones por medio de pesas, denominadas *ducks*, unas pesas pendientes de un gancho cuya morfología era similar a un pato, de ahí su nombre en inglés. Las curvas logradas por esos métodos eran suaves y se adaptaban e iban variando en su curvatura a lo largo de su recorrido, dependiendo de las posiciones y cantidad y la mayor proximidad o distancia de los *ducks*. En el siglo pasado, durante los años cincuenta, se vio la necesidad de contar con una representación matemática de esas superficies que poseen formas libres y orgánicas, formas por así decirlo naturales.

La necesidad de modelizarlas tenía como objetivo el de poder reproducirlas con precisión absoluta. Fue así como comenzaron a desarrollarse las *Non Uniform Rational Basis Spline (NURBS)*, o *Bezier Spline*. Los iniciadores de la modelización de las mismas fueron Pierre Bézier y Paul de Casteljaou, que trabajaban respectivamente para Renault y Citroën. Durante los años sesenta del pasado siglo, se acuñó la terminología *Bézier Splines* en referencia a las *NURBS*. Con la computación se pasó de los *splines* físicos a los algoritmos computacionales, y los antiguos *ducks* o *spline weights*, que eran en realidad pesas para curvar varillas, pasaron en el nuevo lenguaje a convertirse en vértices de control (CV: *Control Vertex*). Aunque inicialmente estas curvas fueron utilizadas en la industria automotriz, pasaron al modelado del *software* gráfico. «La transferencia desde la mesa del diseño hasta el taller de modelos resultaba dificultoso e inexacto cuando los diseños contenían otras formas diferentes a las líneas básicas, círculos y parábolas, aunque se disponía del *hardware* necesario que permitía producir formas complejas en tres dimensiones, faltaba desarrollar el *software* que permitiera comunicar las especificaciones». (Farin 1988). Sin olvidar que la posibilidad de modelización permite la ingeniería inversa y el prototipado rápido, lo que resulta fundamental en la industria. Pero las formas geométricas complejas

exigen métodos de medición adecuados. Las superficies NURBS pueden tener formas orgánicas complejas, los puntos de control influyen las direcciones que estas toman. Las superficies Bézier y las superficies NURBS son en cierto modo cercanas. Bézier desarrolló un algoritmo matemático para describir una superficie libre a través de la posición de sus puntos fijos o puntos anclados. Mientras que el algoritmo NURBS es un desarrollo posterior al primero y añade geometría adicional a las superficies, las llamadas *spans*, que permiten que una única superficie realice grandes modificaciones en cuanto a forma y dirección. Además, resulta posible incorporar muchas superficies Bézier dentro de una superficie NURB. Debido a ello el control de superficies NURBS resulta más complejo. El control metrológico de formas complejas y de las llamadas superficies de Clase A, utilizadas en automoción no serían posibles sin los nuevos medios de medición.

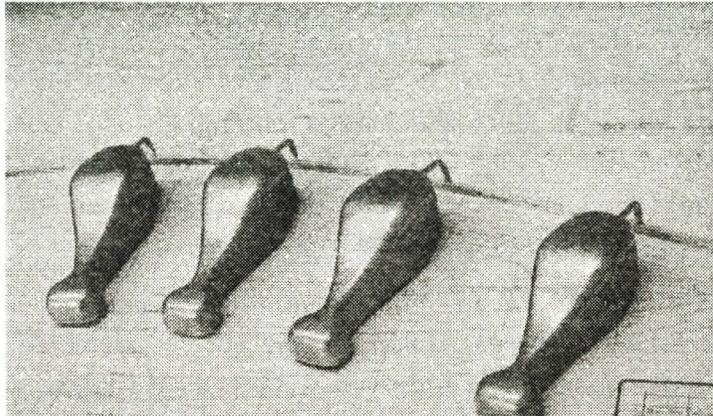


Figura 42. Ducks o pesas para el curvado de splines.

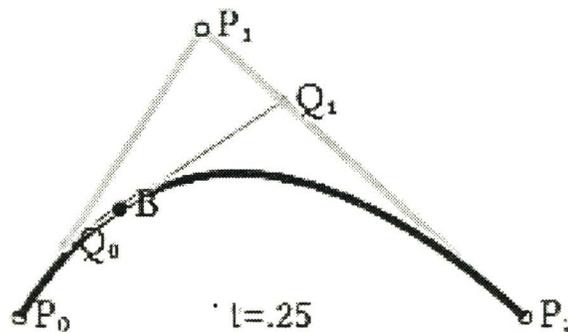


Figura 43. Curva de Bézier.

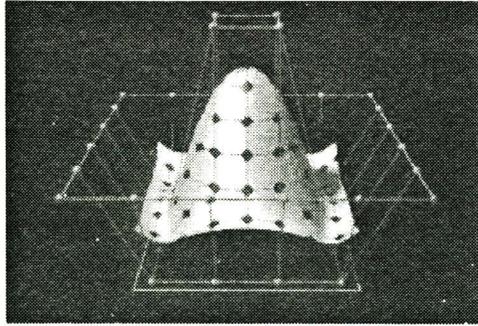


Figura 44. Superficie tridimensional NURB.

3.2.7.1. Máquinas de medición por coordenadas

La máquina de medición tridimensional (MMC) o (CMM) del inglés *Coordinate Measuring Machine*, 'máquina medidora por coordenadas', es un sistema de medida que cuenta con los dispositivos y medios necesarios que permiten desplazar un sistema de palpado y posee la capacidad para determinar las coordenadas espaciales en la superficie de la pieza que se está midiendo. Las MMC pueden tener diferentes disposiciones y diseños, sus tamaños varían en función de lo que han de controlar, desde nanometrología hasta la medición de grandes vehículos. Generalmente, utilizan sistemas de coordenadas cartesianas, aunque algunas máquinas utilizan coordenadas cilíndricas. La aparición de las primeras máquinas medidoras data de los años cincuenta del siglo pasado.

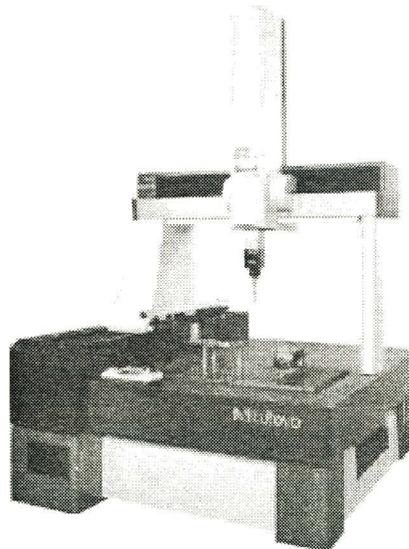


Figura 45. Máquina de Medir por Coordenadas (MMC). (Mitutoyo).

Partes de una MMC:

- Palpador o sonda.
- Sistema que permite su desplazamiento.
- Puente, pórtico y bancada.
- *Software* de medición

La MMC proporciona:

- Mediciones dimensionales: distancia entre elementos, posiciones, ángulos, longitudes, etc.
- Errores o desviaciones respecto a la regularidad geométrica en cuanto a redondez, planitud, paralelismo, rectitud, etc.

Las tipologías de MMC dependen también de la disposición en cuanto a los desplazamientos de sus componentes. Los diferentes tipos resultan adecuados en función del tipo de piezas que sea necesario medir.

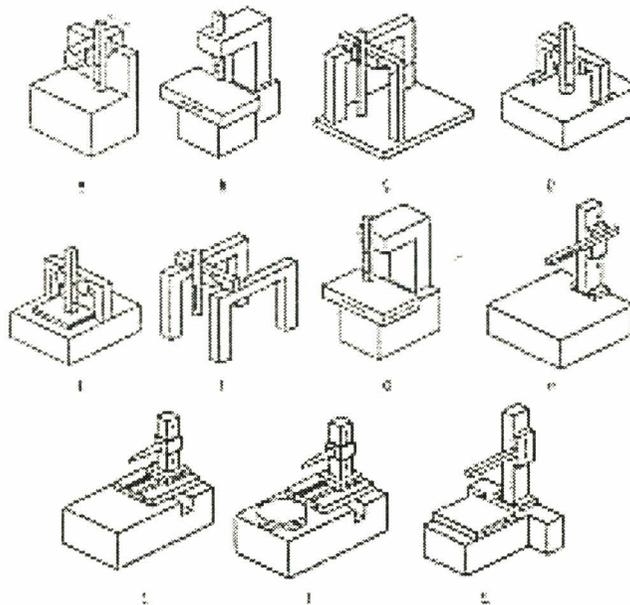


Figura 46. Diversas arquitecturas de MMC (de arriba abajo y de izquierda a derecha): cantilever con mesa fija, cantilever con mesa móvil, puente en forma de L, puente móvil, puente fijo, tipo pórtico (gantry), de columna, de brazo horizontal, con cabeza móvil, de brazo horizontal y mesa fija, de brazo horizontal y mesa fija con plato giratorio, de brazo horizontal y mesa móvil. UNE-EN ISO 10360 1, 2001.

Las mediciones se realizan a través de la sonda o sistema de palpado que es el que toma las coordenadas de puntos concretos de la pieza a medir y, a partir de los cuales, el *software* obtiene la medida.

Existen diferentes sistemas de palpado, aunque pueden dividirse en dos grandes tipos:

- Con palpador de contacto.
- Sistema sin contacto.

Con palpador de contacto

Las primeras tocan la pieza, pudiendo a su vez clasificarse en sondas fijas, de palpado punto a punto, o de palpado continuo o escaneado.

Las sondas fijas se utilizan en MMC manuales y es el operario quien pone la sonda en contacto con la pieza en la posición que precisa. La variedad es grande; sirven para medir superficies curvas, distancias entre elementos, diámetros internos o externos si no se necesita gran precisión.

Las sondas punto a punto, por contacto o de disparo obtienen puntos sobre la pieza y son las que más se emplean. Cuando el palpador entra en contacto, se genera una señal y las coordenadas de la posición quedan registradas. Existen numerosas variantes.

Otro sistema de palpado por contacto es el continuo. Se las denomina sondas de inspección. Estas realizan un registro continuo de las coordenadas en puntos por segundo y con ello definen forma y tamaño. Lógicamente requieren de un *software* lo suficientemente potente como para poder generar las trayectorias de medición. Son muy adecuadas para formas y geometrías complejas y muy útiles en ingeniería inversa.

Los palpadores de contacto para estas máquinas suelen tener forma esférica y pueden ser de diferentes materiales. Quizá los más empleados son los de rubí. Los palpadores de contacto, a su vez, pueden clasificarse en:

- **Pasivos:** constituidos por elementos rígidos, requiere una orden dada al sistema para tomar un punto. Funciona mediante accionamiento.
- **Proporcionales o analógicos:** da una señal eléctrica que es proporcional al desplazamiento del elemento desde la posición cero o de deflexión. Resulta adecuado para medir de modo continuo formas desconocidas.

- **Trigger:** dan una señal eléctrica *on/off* cuando entran en contacto con la pieza a medir.

En función de su sistema de palpador pueden ser articulados, múltiples o con cambio de puntas.

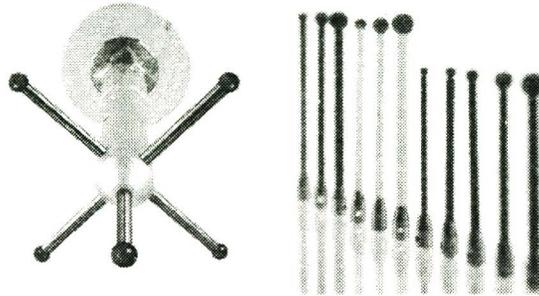


Figura 47. Palpadores de rubí. (Mitutoyo).

Sin contacto

Este tipo de sonda se emplea cuando la pieza a medir es blanda y el contacto podría deformarla. Poseen menor precisión que las de contacto. La sonda de no contacto más empleada es la sonda láser. Esta proyecta un haz sobre la pieza y la posición de la misma se determina mediante triangulación en la lente del receptor. Otro tipo es la sonda de visión, con ella no se lleva a cabo una medición, sino que proporciona una imagen, que se podría denominar fotografía que, digitalizada, proporciona las dimensiones de la pieza. Es un sistema preciso y rápido.

Software de medición

La información recogida debe ser procesada por un *software* adecuado que permita traducirla y reducirla a un conjunto de elementos geométricos elementales mediante ajustes de complejidad variable y a partir de ellos permitirá realizar operaciones y cálculos que informen sobre distancias, ángulos, intersecciones, posiciones etc.

La norma UNE-EN ISO 10360-1:2001 define lo que se considera un *software* de referencia como «aquel que calcula los valores de los parámetros de referencia, así como los residuos de referencia del elemento gaussiano asociado a cada conjunto de datos, siendo dichos valores de referencia los valores numéricos de los parámetros empleados en la parametrización de referencia para un conjunto particular de datos de referencia».

De ello se deduce que el *software* de medición, entendiendo por tal el conjunto de programas, procedimientos y documentos, es de enorme importancia, ya que su adecuación es la que asegura una buena precisión de las mediciones y permite además un control de la máquina en tiempo real.

Las MMC resultan enormemente útiles para el control de geometrías complejas, ya sea durante la producción como posteriormente en los laboratorios.

La técnica de medición por coordenadas es una parte de la metrología dimensional que resulta fundamental para controlar, medir y caracterizar objetos de geometrías complejas y también objetos que poseen múltiples sistemas de referencia.

El procedimiento para la evaluación del rendimiento de las máquinas de medir por coordenadas (MMC) está definido en la norma internacional EN ISO 10360.

Error máximo permisible (MPE)

El máximo error permisible en estas máquinas (MPE) de longitud vienen dado por EN ISO 10360-2.

Siguiendo la citada norma, el procedimiento de ensayo consiste en realizar una serie de mediciones en cinco diferentes longitudes de ensayo en cada una de las siete direcciones, como se muestra, a continuación, en la Figura 43.

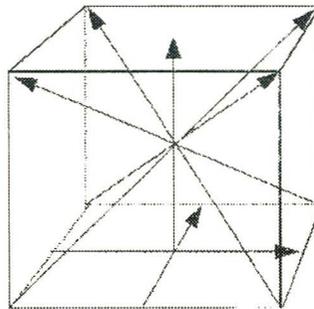


Figura 48. Direcciones típicas de medición de ensayo dentro del volumen de medición. (Mitutoyo).

$$E_{0,MPE} = A + L/K \leq B$$

$$E_{0,MPE} = A + L/K$$

$$E_{0,MPE} = B$$

A: constante en (μm) especificada por el fabricante.

K: constante adimensional especificada por el fabricante.

L: longitud media (mm).

B: valor de límite superior en (μm) especificado por el fabricante.

También se establece el máximo error permisible de forma de palpador individual y el error de palpado de digitalizado máximo permisible.

Verificación de especificaciones mediante artefactos calibrados

Existen artefactos disponibles para la calibración y verificación de las MMC en la industria, la mayor parte en forma esférica. Otros, con diversas configuraciones geométricas, que ponen a prueba o intentan cubrir los diferentes parámetros dimensionales, geométricos e incluso permiten revelar posibles defectos de forma en el tipo de piezas que cada empresa produce. Así, pues, la introducción de artefactos calibrados es una forma de evaluar las prestaciones de una MMC de una forma en cierta manera similar a como la fabricación de ciertas piezas en una determinada máquina herramienta permite poner de manifiesto desviaciones o fallos en la misma.

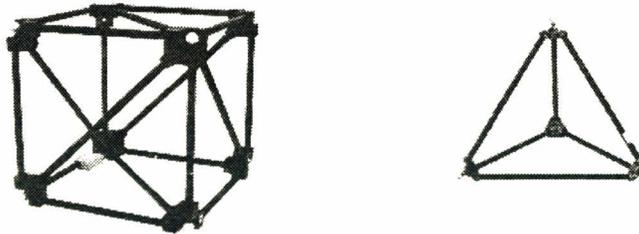


Figura 49. Artefactos de verificación de MMC.

Calibración de MMC

El fabricante calibra la MMC y tras esta operación obtiene un mapa de los diferentes errores geométricos de la máquina. Al suministrarla al cliente y al recepcionarla este, se deberá llevar a cabo un test para comprobar el cumplimiento de las especificaciones. Dicha operativa de verificación deberá repetirse con una periodicidad establecida, salvo incidente, para comprobar que la máquina mantiene sus especificaciones.

No obstante, deben llevarse a cabo verificaciones a más corto plazo. De hecho, cuando se utiliza la máquina, el sistema de palpado debe ser sometido a un

control de error o comprobación de exactitud, lo que se lleva a cabo generalmente con la ayuda de una esfera patrón.

El conjunto de normas que afectan a estas máquinas, proporcionado por el Centro Español de Metrología (CEM), se recogen a continuación:

Normas

UNE-EN ISO 10360-1:2001. Especificación geométrica de productos (GPS). Ensayos de aceptación y de verificación periódica de máquinas de medición por coordenadas (MMC). Parte 1: Vocabulario (ISO 10360-1:2000)

UNE-EN ISO 10360-2:2002. Especificación geométrica de productos (GPS). Ensayos de aceptación y de verificación periódica para máquinas de medición por coordenadas (MMC). Parte 2: (MMC) utilizadas para la medición de tamaño. (ISO 10360-2:2001).

UNE-EN ISO 10360-3:2001. Especificación geométrica de productos (GPS). Ensayos de aceptación y de verificación periódica para máquinas de medición por coordenadas (MMC). Parte 3: (MMC) con el eje de una mesa giratoria como cuarto eje. (ISO 10360-3:2000).

UNE-EN ISO 10360-4:2001. Especificación geométrica de productos (GPS). Ensayos de aceptación y verificación de máquinas de medición por coordenadas (MMC). Parte 4: (MMC) usadas en modo de medición por barrido. (ISO 10360-4:2000).

UNE-EN ISO 10360-5:2001. Especificación geométrica de productos (GPS). Ensayos de aceptación y de verificación periódica de máquinas de medición por coordenadas (MMC). Parte 5: (MMC) con cabezales de palpadores múltiples. (ISO 10360-5:2000).

UNE-EN ISO 10360-6:2002. Especificación geométrica de productos (GPS). Ensayos de aceptación y de verificación periódica de máquinas de medición por coordenadas (MMC). Parte 6: Estimación de errores en determinación de elementos *gaussianos* asociados (ISO 10360-6:2001).

3.3. Controles microgeométricos

Características superficiales

La superficie nominal representada en un plano es siempre una abstracción. Cualquier superficie real, por perfecta que parezca, presentará huellas.

La vista microscópica de la superficie de una pieza pone de relieve imperfecciones e irregularidades de todo tipo. El exterior de la misma siempre será una superficie cuya topografía va a mostrar, en sección transversal rugosidades, ondulaciones y fallos de diversa índole. También presentará un patrón a modo de rayado, más o menos paralelo, con una dirección repetitiva y que es la huella resultante del proceso mecánico mediante el cual se ha obtenido la huella dejada por la herramienta al mecanizar la pieza.

En principio, las características superficiales no eran consideradas como parte de la metrología, pero actualmente por su importancia sí lo son. La descripción de los diferentes perfiles y parámetros que encontramos en el perfil ampliado de una superficie debe ser un valor a tener en cuenta tanto en el diseño de la pieza, acotándolo, y tras la ejecución de la misma, asegurando que cumple con las características, valores, condiciones y orientación necesarios para su correcto funcionamiento.

Se entiende por rugosidad de una superficie ese trazo o huella que se produce en la misma como consecuencia de los procesos de mecanización a los que se la ha sometido. Por lo tanto, la rugosidad está relacionada con el procedimiento de trabajo empleado de tal forma que este se elige en función de la calidad superficial que se desee obtener. La rugosidad se contempla como textura superficial que está definida como «las desviaciones aleatorias o repetitivas de la superficie geométrica que constituyen la topografía tridimensional de la superficie». No obstante, la textura superficial incluye además aspectos como la ondulación, dirección de las irregularidades, las imperfecciones superficiales y las desviaciones de forma sobre la zona de la superficie considerada.

Parámetros de rugosidad

Longitud básica (l_r): longitud del perfil geométrico elegida para evaluar la rugosidad sin que se consideren otras irregularidades.

Longitud de medida o exploración: longitud total que se emplea para evaluar los parámetros que caracterizan la rugosidad superficial. Es la suma de varias longitudes de evaluación.

Profundidad media de rugosidad (R_z): es el valor medio de los cinco valores (R_z) de las cinco longitudes de muestreo (l_r) y dentro de la longitud de evaluación (l_n). Debe ser tenida en cuenta para la mayor parte de las superficies.

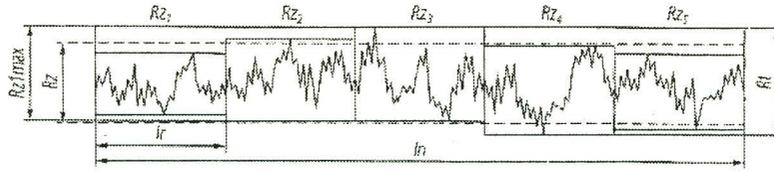


Figura 50. Denominaciones de un perfil representando una superficie ampliada con su rugosidad. (Mitutoyo).

La superficie ampliada no solo mostrará crestas y valles repetidos, rugosidad, sino que puede presentar también desviaciones de planitud más espaciadas que las líneas de rugosidad debidas a tratamientos térmicos que han deformado el material de partida, a vibraciones en las máquinas, o a deflexiones de trabajo. Estas alteraciones de planitud sobre la superficie nominal se denomina ondulaciones.

Rugosidad y ondulación pueden y suelen presentarse conjuntamente. A modo de ejemplo, se puede comparar con un campo de cultivo que no sea perfectamente plano: las ondulaciones serían los desniveles del terreno mientras que la rugosidad serían las marcas del surco del arado. Además de identificar ondulación y rugosidad, se pueden encontrar fallas o defectos propios del material, como podrían ser inclusiones, grietas, abolladuras, etc.

Desde el punto de vista de la función que la superficie vaya a desempeñar en el conjunto mecánico en el que se integre, no solamente los valores de la rugosidad cuentan, sino que también es importante tener en cuenta el sentido y la orientación que dichas huellas tengan. Lógicamente, la dirección de la rugosidad viene dada por el movimiento reiterativo de la herramienta que ha servido para fabricar la superficie. Si se trata por ejemplo de superficies que deban deslizarse entre sí, convendría que las rugosidades discurran en el mismo sentido o bien que sean multidireccionales. Pero si la pieza debe quedar apoyada y en reposo sobre otra y lo que se persigue es aumentar o hacer máxima la adherencia entre ellas, convendrá que las rugosidades o huellas de mecanizado estén situadas en sentidos opuestos. En unos casos se deberá prever una rugosidad adecuada para lograr una superficie que admita pintura y que, por tanto, deberá tener una buena adherencia. O bien interesa conseguir una superficie que ha de ser lubricada y que precisa retener aceite de lubricación para garantizar su vida útil. Dado que el tema es de suma importancia, dependiendo de la función de la pieza también se

pueden y, en según qué casos, se debe especificar, la orientación de rugosidad de la superficie, siendo posibles las siguientes:

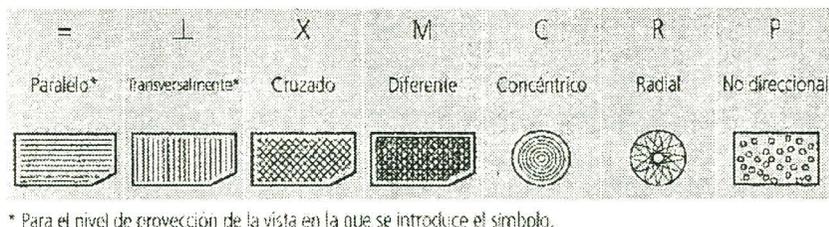


Figura 51. Orientaciones de rugosidad y sus símbolos. (Mitutoyo).



Figura 52. Denominaciones de un perfil representando una superficie ampliada con su rugosidad. (Mitutoyo).

Perfil real: es el perfil resultante de la intersección de la superficie de la pieza de trabajo y un plano normal a la misma y tomado en la dirección en la que maximice el valor de la rugosidad de la superficie, generalmente en ángulo recto respecto a la disposición de las marcas de mecanizado.

Perfil medido: es el perfil resultante de explorar el perfil real con un palpador que, en razón del tamaño mismo, en función del valor de su radio, produce un filtrado mecánico del perfil, unido al provocado por su deslizamiento. Las imperfecciones de la superficie, tales como grietas o abolladuras, no deben incluirse dentro del perfil y, en caso necesario, se pueden fijar para ellas tolerancias siguiendo la norma DIN EN ISO 8785.

Perfil principal: perfil P, es el perfil resultante del filtrado electrónico de paso bajo del perfil medio utilizando una longitud de onda de corte (λ_s). El proceso elimina los componentes más cortos de longitud de onda que se consideren pertinentes para la medición de la rugosidad. Los parámetros se designan como (P) y se evaluarán siempre dentro de las longitudes de muestreo establecidas. Esto es igual a evaluar la longitud (In), longitud total del perfil registrado.

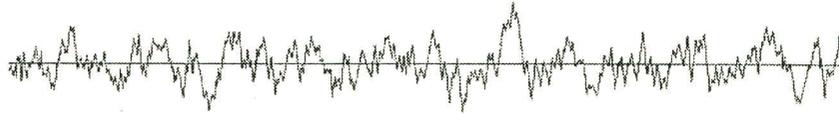


Figura 53. Perfil de rugosidad con su línea media con filtrado de paso alto. (Mitutoyo).

Perfil de ondulación (perfil W): es el perfil que resulta del filtrado electrónico de paso bajo del perfil principal con la longitud de onda de corte (λ_c).

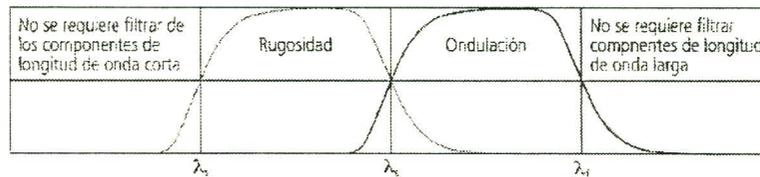


Figura 54. Denominaciones de un perfil representando una superficie ampliada con su rugosidad. (Mitutoyo).

Basado EN ISO 4287 y EN ISO 16610-21.

Parámetros de rugosidad

Por convenio, todos los parámetros de rugosidad en 2D se definen con la letra **(R)** seguida de subíndices que indican la fórmula de cálculo empleada.

Valor de la media aritmética de rugosidad (Ra): es la media aritmética de los valores absolutos de las desviaciones de perfil, **(Z)**, tomadas respecto a la línea media del perfil de rugosidad.

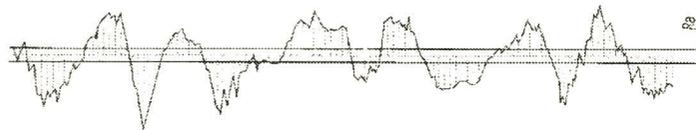


Figura 55. Valor (Ra) de la media aritmética de rugosidad. (Mitutoyo).

Componente de material del perfil, Rmr(c): es la fracción de línea resultante de cortar un perfil a través del material y a una altura estipulada (**c**), por encima de la línea media en micras y expresada como porcentaje. Su valor ha de ser tenido en cuenta para superficies de guía y superficies de sellado que han de moverse una contra otra.

Altura total del perfil de rugosidad, (R_t): es la diferencia entre la altura (Z_p) del pico más alto y la profundidad (Z_v) del valle más profundo del perfil, en relación a la línea **media** y comprendida dentro de la longitud de muestreo establecida, (l_n).

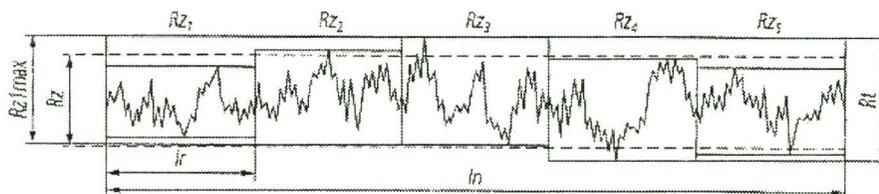


Figura 56. Altura total del perfil de rugosidad (R_t) y profundidad media de rugosidad (R_z). (Mitutoyo).

Anchura media del pico, (R_{Sm}): es el valor medio de la anchura de los elementos del perfil, (X_s), los umbrales de recuento verticales y horizontales habiendo sido fijados para realizar la evaluación.

Altura máxima del perfil de rugosidad, (R_{zi}): es la suma de la altura del pico más alto del perfil y de la profundidad del valle más profundo del mismo, en relación a la línea media y comprendidas ambas dentro de la longitud de muestreo.

La curva de componente del material del perfil refleja el parámetro componente de material ($R_{mr(c)}$) del perfil como una función de la altura de la sección (c) que es la curva de Abbott-Firestone.

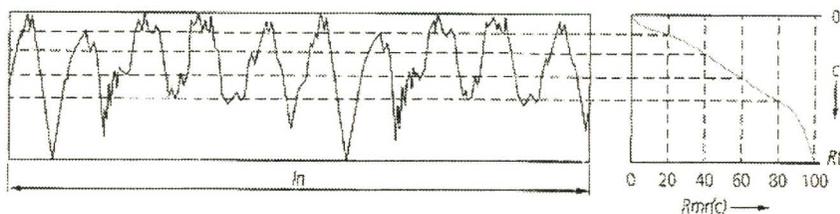


Figura 57. Denominaciones de un perfil, una superficie ampliada con su rugosidad. (Mitutoyo).

Curva de Abbott-Firestone

La curva de Abbott-Firestone es la representación gráfica de los diferentes niveles (c) frente a $R_{mr(c)}$.

Se la conoce también como «curva de tasa de material del perfil» porque lo que en realidad analiza es la relación entre vacío o hueco y el material a diferentes niveles de profundidad que presenta la superficie. En el eje horizontal aparece reflejada la relación vacío-material, mientras que, en el vertical, muestra la capa o nivel en la que dicha relación se mide.

La curva tiene gran importancia pues sirve para reflejar la mayor o menor capacidad de retener lubricantes, o también la capacidad de adherencia de pintura sobre la misma.

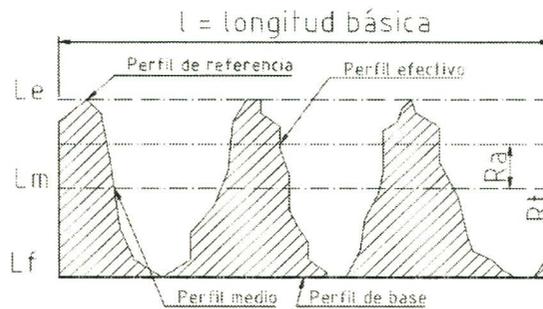


Figura 58. Denominaciones de un perfil, una superficie ampliada con su rugosidad.

La Figura 58 representa una superficie seccionada y aumentada con detalle de las formas y las denominaciones del perfil determinado por las normas UNE 82-301-76 e ISO/R468.

(L_m): es la línea imaginaria trazada de tal forma que el área de las crestas, salientes, sea igual a la de los valles, entrantes, y que corresponde al perfil medio.

(L_e): es la línea imaginaria que pasa por los puntos más prominentes, cimas de las crestas, que es paralela a (L_m) y se corresponde con el perfil de referencia.

(L_f): es la línea imaginaria que pasa por los puntos más profundos de los valles, es paralela a (L_m) y se corresponde con el perfil de base.

Longitud básica: es la longitud que se toma como base, tramo de referencia o de evaluación de la aspereza del perfil efectivo elegida para estudiar la rugosidad.

(R_t) o (R_{max}): es la altura máxima de las irregularidades que se presenta en la longitud base o tramo de referencia, o lo que es lo mismo, la diferencia entre el punto de cota más alta y el de cota más baja o también la distancia entre las dos líneas paralelas (L_e y L_f) a la línea media L_m y tangentes al perfil en los puntos más alto y más bajo de la longitud básica.

(Ra): es la media aritmética de las desviaciones respecto a la línea media del perfil. Para el cálculo de la rugosidad media se toman dichas desviaciones en valor absoluto ya que no se tiene en cuenta el signo algebraico. Este valor de la rugosidad es el valor práctico que suele utilizarse.

(Rs): es la media geométrica de las distancias del perfil de rugosidad (**R**) respecto a la línea media, en la longitud de evaluación L_m .

(Rt): es la altura máxima, es la distancia vertical existente entre el punto más alto y el más bajo, es decir, entre la cresta más elevada y el valle más profundo.

(Rp): también denominada profundidad de alisadura. Es la distancia entre la cresta más elevada y la línea central.

(Ar): es el valor medio de los pasos entre oscilaciones consecutivas.

(tp): es la relación entre la longitud portante obtenida a una profundidad de corte determinada y la longitud básica L_m .

Es la representación gráfica de todos los valores del porcentaje portante (**tp**), en función de la profundidad de corte establecida.

Rugosidad, sus clases y los procesos de fabricación

La rugosidad obtenida en una superficie depende del proceso de fabricación al que haya sido sometida. A continuación, en la Tabla 11, puede verse la profundidad de aspereza que cada uno de los diferentes procesos de mecanizado puede lograr.

Proceso	Profundidad de aspereza (μm)
Cepillado Torneado normal Fresado Taladrado	5-30 μm
Brochado	0.15-15 μm
Escariado	1-7 μm
Torneado muy fino Rectificado	0.5-3
Rectificado muy fino Lapidado Super-Finish	0.1-0.5 0.05-0.5 0.03-0.5

Tabla 3. Profundidades de aspereza correspondientes a los diferentes procesos de fabricación.

Profundidad de aspereza (μm)	Clase de rugosidad
50	N 12
25	N 11
12.5	N 10
6.3	N 9
3.2	N 8
1.6	N 7
0.8	N 6
0.4	N 5
0.2	N 4
0.1	N 3
0.05	N 2
0.025	N 1

Tabla 4. Relación entre los valores de profundidad de aspereza y las clases de rugosidad.

Medición de la rugosidad

Dependiendo del uso e importancia de la superficie, la rugosidad tendrá menor o mayor importancia. En ciertos casos puede ser suficiente una inspección visotáctil para comprobar si resulta similar a una superficie de muestra tomada como referencia. En la mayor parte de los casos habrá que comprobar que la rugosidad obtenida tras el proceso de fabricación cumple con los requisitos en cuanto a valores, orientación, curva de Abbott-Firestone, etc.

Reglas de medición de rugosidad

Los valores de medición de rugosidad, en lo que respecta a parámetros verticales R_t , R_z , $R_{z1\text{máx}}$ y R_a , varían entre un -20% y un $+30\%$, por lo que una medición única no proporciona una visión que garantice el cumplimiento de la tolerancia. Por ello, la norma DIN EN ISO 4288, en su anexo, establece el procedimiento a seguir.

Regla máxima

La totalidad de los parámetros de rugosidad afectados por el sufijo «máx» representan el valor medio máximo medido en las cinco longitudes de muestreo. La medición debe llevarse a cabo al menos en tres posiciones. En la superficie en la que se aprecie pueden hallarse los valores mayores y es condición que en ninguna de las posiciones se supere el límite establecido.

Regla de 16 %, criterios de aceptación y rechazo

Todos los parámetros de rugosidad que no lleven el sufijo «máx» representan el valor medio medido en las cinco longitudes de muestreo:

El 16 % de los valores medidos podrán superar el límite, procedimiento paso a paso:

1. Si el primer valor medido está por debajo del 70 % del límite, se considerará que cumple.
2. En su defecto, se llevarán a cabo dos mediciones más en otros puntos de la superficie. Si los tres valores obtenidos estuvieran por debajo, se considerará que cumplen.
3. En su defecto, se realizan nueve mediciones más en otros puntos de la superficie. Si un total de no más de dos valores medidos superasen el límite, se considerará que cumple.

	Símbolo básico	a Se requiere valor de rugosidad de la superficie b Otro requisito de la superficie
	Se requiere eliminación de material mediante mecanizado	c Proceso de producción (por ejemplo, torneado, rectificado, cromado)
	No se permite eliminación de material	d Símbolo que define la dirección de la disposición del mecanizado e Tolerancia de procesamiento (en mm)
	El mismo acabado para todas las superficies	x Letra para simplificar referencia si el espacio es limitado

	Entradas en el símbolo (parte superior)	
	Símbolos que definen la dirección de la disposición del mecanizado (posición d, abajo)	

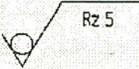
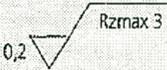
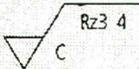
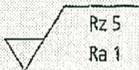
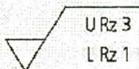
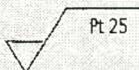
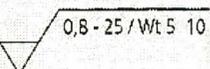
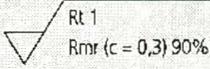
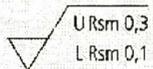
Ejemplos	Notas explicativas
	<p>No se permite el procesamiento de retirada de material, característica de regla de transferencia, <i>perfil-R</i>, regla del 16%, profundidad media de rugosidad 5 μm (límite superior)</p>
	<p>Proceso de retirada de material, característica de regla de transferencia, <i>Perfil-R</i>, regla máx., profundidad máxima de rugosidad media 3 μm (límite superior); tolerancia de procesamiento 0,2 mm</p>
	<p>Proceso de retirada de material, característica de regla de transferencia, <i>perfil-R</i>, la evaluación de la longitud consiste de 3 longitudes de muestreo, regla del 16%, profundidad de rugosidad media 4 μm (límite superior); muescas de superficie concéntricas</p>
	<p>Proceso de retirada de material, característica de regla de transferencia, <i>perfil-R</i>, regla del 16%, profundidad media de rugosidad 5 μm, valor medio aritmético de rugosidad 1 μm (límite superior)</p>
	<p>Proceso de retirada de material, característica de regla de transferencia, <i>perfil-R</i>, regla del 16%, profundidad media de rugosidad entre 1 μm (límite inferior) y 3 μm (límite superior)</p>
	<p>Proceso de retirada de material, característica de regla de transferencia para λ_s, sin filtro λ_c, <i>perfil-P</i>, longitud de la traza es igual a la longitud de la pieza de trabajo, regla del 16%, altura total del perfil principal 25 μm (límite superior)</p>
	<p>Proceso de retirada de material, características del filtro 0,8 (λ_c) - 25 ($\lambda_s = lw$) mm, <i>perfil-W</i>, la longitud de evaluación consta de 5 longitudes de muestreo $ln = 5 * lw = 125$ mm, regla del 16%, altura total del perfil 10 μm (límite superior)</p>
	<p>Proceso de retirada de material, característica de regla de transferencia, <i>perfil-R</i>, regla del 16%, altura total del perfil de rugosidad 1 μm (límite superior); componente de material del perfil del 90% dentro de la altura de la sección $c = 0,3$ μm (límite inferior)</p>
	<p>Proceso de retirada de material, característica de regla de transferencia, <i>perfil-R</i>, ancho medio de la muesca entre 0,1 mm (límite inferior) y 0,3 mm (límite superior)</p>
	<p>Explicación del significado (derecha) de referencia simplificada (izquierda), cuando el espacio es insuficiente para una definición completa.</p>

Tabla 5. Símbolos que expresan las direcciones de las huellas de la rugosidad. (Mitutoyo).

Sobre signos superficiales consultar UNE 1 037-78, ISO 1 302, sobre estados superficiales UNE 1-037-83, ISO 1302 y sobre parámetros de rugosidad EN ISO 4287 y EN ISO 16610 – 21.

Control de la rugosidad

Para el control de la rugosidad existen diferentes tipos de equipos de medida: unos son adecuados para mediciones en laboratorios y otros son portátiles y funcionan con autonomía con respecto a la red eléctrica. Los de laboratorio, más sofisticados, pueden proporcionar un gran número de datos sobre la superficie. Los portátiles suministran el valor de aquellos parámetros a partir de los cuales se obtiene el valor de la rugosidad, que puede leerse directamente. La forma de proceder consiste en poner en contacto con la superficie el palpador de diamante del que están provistos. En un primer recorrido, toma las referencias y sucesivamente procede a la corrección o filtrado de las curvas y proporciona finalmente los valores buscados.

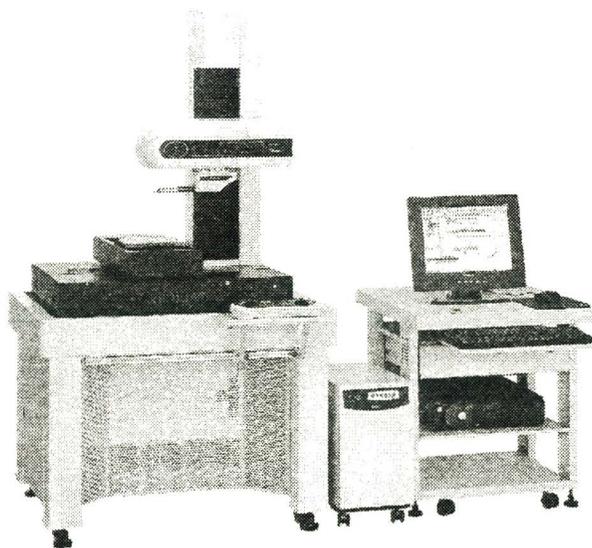


Figura 59. Equipo medidor de rugosidad. (Mitutoyo).

Se podría decir que la diferencia que separa los grandes grupos de equipos de medida reside en el tipo de tratamiento de señal proporcionada por el amplificador. Algunos conservan un tratamiento analógico de las mismas, mientras que la mayor parte la digitalizan para explotarla mediante la lógica interna del propio equipo o bien para pasarla a través de su conexión a un

computador para que, mediante un software específico, explote los datos. Los rugosímetros pueden clasificarse en función del sistema que proporciona la amplificación a partir del recorrido del palpador y que puede estar basado en diferentes principios, dependiendo de que se trate de un palpador inductivo, capacitivo, piezoeléctrico, etc.

Una vez medida la rugosidad (R) nos queda el estudio de la ondulación (W), y por suma de ambas se obtiene lo que se denomina perfil completo (P)

Para la obtención de la ondulación, se recurre a técnicas de filtrado que permiten separarla mediante el uso de filtros electrónicos denominados de paso alto (*cut-off*). El criterio más utilizado para la separación entre rugosidad y ondulación suele ser la denominada longitud básica (l_c). Este valor puede ser elegido por el usuario dentro de un cierto campo de variación, estando normalizados los valores (de 8, 2.5, 0.8, 0.25 y 0.08).

Convencionalmente se suele extender el campo de la macrogeometría hasta incluir la ondulación, reservando la rugosidad para el campo de la microgeometría.

Continúa utilizándose el llamado **método viso-táctil**, que, a pesar de que pueda parecer rudimentario, es de utilidad en aquellos acabados mediante torno, fresadora y rectificadora. Se basa en la comparación de la superficie fabricada con un patrón normalizado de rugosidad conocida.



Figura 60. Perfil completo (P), Ondulación (W) tras filtrado de la rugosidad y Rugosidad (R) tras filtrado de la ondulación.

Consultar UNE 82-302-92, UNE 82-303-91, UNE 82-305-91 y UNE 82-315-86.

Anexo 1. Trazado

El trazado es una operación previa a los mecanizados que consistente en marcar sobre la superficie exterior de la pieza, con una punta de trazar, todas aquellas líneas que deben delimitar sus caras, ejes o planos de simetría, centros de mecanizado etc. Es decir, las líneas o ejes básicos que han de servir para su posterior fabricación.

La importancia del trazado reside en el hecho de que si no está correctamente realizado malogrará la fabricación de la pieza. Por tanto, cualquier error cometido durante el mismo puede invalidarla. El trazado es, pues, la primera operación metrológica, y sirve para:

- Asegurar que la pieza bruta contenga a la pieza acabada.
- Optimizar el material disponible.
- Facilitar la orientación y nivelación de la pieza sobre la máquina-herramienta.
- Servir de guía y referencia en operaciones de acabado o desbaste de poca precisión.

Tipos de trazado

Existen diferentes tipos de trazado, según la forma en que este se realice:

- Trazado plano.
- Trazado «al aire» o espacial.

Trazado plano: consiste básicamente en efectuar sobre la superficie plana de una pieza o chapa una simple operación de dibujo, utilizando dicha superficie en lugar de papel. Tal superficie ha de ser preparada o tratada previamente. En el caso de que se trate de superficies metálicas de acero o de zinc, se humedecen en una disolución de sulfato de cobre.

Es necesario tener en cuenta todos los conocimientos que se posean en geometría y dibujo, siendo cuidadosos en la exactitud del trabajo (errores de trazado conllevan errores constructivos).

Como norma para proceder, deben trazarse primero los ejes y a partir de ellos las líneas restantes.

El uso de este tipo de trazado está muy generalizado en talleres de chapistería y calderería.

Trazado al aire o espacial: es el más utilizado en el taller mecánico y presenta mayor complicación que el trazado plano, consiste en realizar el trazado simultáneo sobre varias de las superficies o bien sobre una de sus caras si esta está apoyada sobre una superficie de referencia.

Instrumentos para el trazado: aparte de rotuladores permanentes, puntas de trazado y granetes, se utilizan también compases de diversos tipos y gramiles. Además, las piezas pueden marcarse durante esa fase con códigos, números o incluso incluyendo instrucciones. Como elementos auxiliares en las operaciones de trazado se utilizan reglas, goniómetros, escuadras, cubos de trazar, calzos, gatos y escuadras de apoyo, etc. y como superficies de apoyo mesas de planitud, los «mármoles», superficies de trazar, granetes, gramiles, reglas graduadas, compases, escuadras, cubos de trazar.

Los instrumentos empleados en el trazado, así como el resto de los accesorios, deben ser periódicamente calibrados, ya que el trazado posee gran importancia metrológica pues es la operación que fija las directrices posteriores.

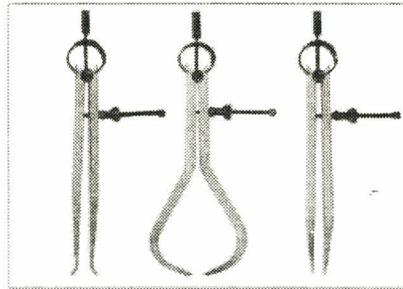


Figura 61. Compases de trazado.

Sistemas de trazado

En calderería resulta frecuente acometer trazados de desarrollos de piezas tales como cilindros, prismas, pirámides, conos, etc., todos ellos trazados planos, pero que se abordan por los diferentes procedimientos que a continuación se citan:

- Sistema por paralelas.
- Sistema radial.
- Sistema de triangulación.

Sistema por paralelas: se utiliza para determinar desarrollos de cuerpos prismáticos y cilíndricos mediante trazado por líneas paralelas y sirve para la determinación de trazados de cilindros cortados oblicuamente por uno o ambos extremos. Para el trazado de codos formados por piezas cilíndricas, trazado de tapas para bocas de cilindros cortados oblicuamente y para el trazado de prismas cortados oblicuamente.

Sistema radial: se utiliza para la determinación del desarrollo de piezas cónicas o troncocónicas cortadas paralela u oblicuamente a las bases.

Sistema de triangulación: se utiliza para el cálculo de elementos complicados como pueden ser campanas de extracción o tolvas.

El tema de los desarrollos de las distintas figuras geométricas es propio de la asignatura de representación gráfica, no obstante, su conocimiento es necesario en los talleres para realizar trazados para la construcción de elementos de calderería y en ese aspecto guarda relación con la metrología.

Anexo 2. Inspección y muestreos

La inspección, en general, puede definirse como el examen crítico de algo. Cuando nos referimos a inspección en su acepción industrial, conviene añadir que es el examen crítico orientado a un fin específico y predeterminado. En un taller, sea grande o pequeño, resulta fácil asimilar la inspección de piezas a la comprobación metrológica de las mismas mediante instrumentos y accesorios de las condiciones dimensionales y de las tolerancias de fabricación de las piezas resultantes de una determinada fabricación, los controles metrológicos, mediciones y verificaciones. En efecto, forman parte de las inspecciones, aunque no son el único aspecto a inspeccionar. Existen inspecciones oculares, realización de ensayos y detección de posibles anomalías, errores, fallos o defectos por métodos que pueden ser muy variados.

Funciones

En general puede afirmarse que el acto de la inspección supone la comparación del producto fabricado con ciertas especificaciones o con una determinada normativa. Y conlleva, en caso de ser aprobada, el aseguramiento de que el producto satisface los requisitos prefijados y, por tanto, ha sido fabricado con los materiales adecuados y que las operaciones necesarias para la fabricación se han realizado correctamente. En ocasiones, los requisitos pueden ser relativamente sutiles, como por ejemplo aspecto o color, y alejados de la funcionalidad. Esto nos lleva a considerar que la función del inspector es la de comprobar condiciones prefijadas, no inventarlas o diseñarlas.

Principios

La inspección conlleva un principio fundamental: **ningún producto puede ser mejor que las partes que lo componen**. De este principio se deduce otro: **la inspección final no es suficiente**, sino que debe extenderse a los componentes del producto antes de su ensamblaje. Por otra parte, los defectos en los elementos pueden estar siendo causados por un defecto o error en las máquinas, que previsiblemente producirán más piezas defectuosas, por lo que **la inspección debe hacerse al mismo tiempo que se realizan determinadas operaciones productivas**, para evitar que continúen produciéndose nuevos errores.

En cuanto a las funciones de la inspección, sintetizando, podemos reducirlas a dos cuestiones básicas: aseguramiento de conformidad de las especificaciones y juzgar el aspecto. Las posibles características a comprobar desde una perspectiva metrológica general podrían ser: cumplimiento de tolerancia de medida, calidad de acabado superficial, peso, dureza, o la detección de cualquier tipo de defecto de fabricación susceptible de ser producido por las máquinas, el material, errores de los operarios u otras causas.

Clases de inspección

Existen diversos tipos de inspección que a continuación se detallan y que no son excluyentes entre sí. La elección de unos u otros dependerá de las características que se deseen comprobar:

- Inspección manual.
- Inspección ocular.
- Inspección automática.
- Inspección mediante ensayos.

En cuanto a la fase en la que esta se realiza puede clasificarse en:

- Inspección de proceso.
- Inspección de lote.
- Inspección de utillaje.
- Inspección de recepción.
- Inspección final.

Cuando la inspección es final, puede realizarse al 100 %, es decir, sobre todas y cada una de las piezas o elementos, o bien llevarse a cabo sobre una muestra, o incluso sobre la primera pieza del lote.

Es muy importante ser conscientes de que el plano es una especificación. En este sentido, resulta obvia la importancia de poseer la capacitación necesaria para interpretar el plano, con toda la información que este nos suministra. Pero frecuentemente los planos que llegan a los centros de fabricación sufren sucesivas modificaciones y revisiones. Una causa muy común de errores es no contar con la última revisión.

Otros factores causantes de defectos guardan relación con el tipo de material de construcción.

Muestreos y control de calidad

El control de calidad está ligado a los muestreos y a las conclusiones obtenidas a partir de los mismos, tras el análisis de las muestras.

Por definición, muestra es una parte tomada para probar el todo.

Tamaño de muestra: se denomina tamaño de muestra al número de elementos considerado del total del lote o bien a un porcentaje determinado respecto a la totalidad del mismo.

El primer principio de los muestreos es utilizar tan solo el número de muestras necesarias para probar lo que se pretende.

Desde el punto de vista estadístico, a mayor tamaño de muestra menor riesgo. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que según se aumenta el tamaño aumentan los costes, por lo que será necesario buscar un compromiso coste-riesgo tolerable.

Muestreo simple: cuando se toma una muestra al azar y piezas en relación con el tamaño del lote, también al azar, y se acepta o rechaza el lote según los resultados obtenidos.

Doble muestreo: en este tipo de muestreo es necesario extraer una muestra n_1 del lote N . Esta muestra ofrecerá un determinado número de defectos que es necesario comparar con el número de aceptación establecido. Según los resultados obtenidos, puede acudir a un segundo muestreo y, dependiendo del resultado de este, se produce la aceptación o rechazo definitivo del lote.

Muestreo progresivo: es un doble muestreo prolongado, en el que se trata de comparar el número acumulado de defectos en cada etapa del proceso con un par de números que representan respectivamente la aceptación y el rechazo.

Muestreo al azar: solamente podemos decir que estamos tomando muestras al azar cuando la toma se hace de tal forma que una unidad tiene la misma probabilidad que otra cualquiera de ser extraída.

Tablas de muestreo: son de gran utilidad para el inspector. En ellas figuran los siguientes parámetros: tamaño de lote, tamaño de muestra, número de aceptación y nivel de calidad aceptable.

Nivel de calidad aceptable: *Acceptable Quality Level (AQL)* o tolerancia del lote, entendida en cuanto al máximo número posible de piezas defectuosas que este puede contener. Suele oscilar entre un 0.5 % y un 5 %, dependiendo de múltiples factores.

La decisión de mayor trascendencia es la de determinar el nivel de calidad admisible. Una vez acordado, comprobaremos que el resultado de la inspección en cuanto al número de piezas defectuosas hallado deberá ser menor o igual que el número de aceptación correspondiente en la tabla para el nivel aceptable de calidad fijado.

Bibliografía

- AENOR**, (1999) *Metrología práctica de la medida en la industria*.
- BENNICH, P. NIELSEN, H.** (2005) *Una visión global de GPS, Una herramienta para el ahorro de costes*, primera ed. Institute for Geometrical Product Specifications.
- BUSCH, T.** (1989) *Fundamentals of Dimensional Metrology*. Wilkie Brothers Foundation, 2nd ed.
- CARRO, J.** (1978) *Curso de metrología dimensional*. Madrid. Ed. Sección de publicaciones ETSII - UPM.
- CARRO, J. (coord.)** (1984) *Clasificación de instrumentos de metrología dimensional, Sistema de Calibración Industrial*. Madrid. Dirección General de Innovación Industrial y Tecnología, Ministerio de Industria y Energía.
- CARRO, J., SÁNCHEZ PÉREZ, A.M.** (1984) *Valores experimentales de la relación incertidumbre/división de escala en instrumentos de metrología dimensional*. III Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Anales de Ingeniería Mecánica, año 2, número 2.
- CARRO, J.** *Medidas de redondez, consejo para la práctica metrológica número 6*. AECC, Madrid (1980).
- CARRO, J.** *Evaluación de la incertidumbre en mediciones de rectitud en guías de máquinas*.
- COLLET-HOPE**, (1976) *Mediciones en ingeniería*. Ed. Gustavo Gili.
- COMPAIN, L.** (1970) *Metrología de taller*. Ed. Urmo.
- CORTES DÍAZ, J.M.** (1986) *Unidades de trabajo de tecnología mecánica*. Madrid. Ed. Ciencia 3.
- ESTÉVEZ, S.** (1977) *La medición en el taller mecánico*. CEAC. Madrid.
- GARCÍA MATEOS, A.** (1987) *Tolerancias, ajustes y calibres*. Ed. Urmo.
- GONZÁLEZ, C., ZELENY, R.** (2016) *Metrología*. Ed. McGraw-Hill
- GRIFUL, E., CANELA, M. A.** (2010) *Gestión de la calidad*. Universidad Politécnica de Cataluña.

JIMÉNEZ BALBOA, L. (1967) *Prontuario de ajustes y tolerancias*. Ed. MARCOMBO S. A., Barcelona.

KENNEDY, C. (1973) *Inspección y calibrado*. Ed. Urmo.

MATEOS PALACIO, B., MORO PIÑEIRO, M., (2000) *Tecnología mecánica y metrotecnia, 3. Elementos de engranajes, Metrología*. Universidad de Oviedo, Servicio de Publicaciones.

MORO PIÑEIRO, M. (2000). *Metrología: Introducción, conceptos e instrumentos*. Ed. Universidad de Oviedo, Servicio de Publicaciones.

MORRIS, A. S. (1997) *Measurement and calibration requirements for quality assurance to ISO 9000*. John Wiley & Sons Inc.

MURALL, V. (1998) *Metrología avanzada y máquinas de medir*. Gijón. Ed. CFID.

PÉREZ, J.M. *Complementos de tecnología mecánica y metrología dimensional*. Sección de publicaciones ETSII-UPM Madrid (1980).

PICCIOLATO, E. (1964) *Tolerancias de fabricación*. Madrid. Ed. Instituto Nacional de Racionalización del Trabajo.

PIEGL, L., TILLER, W. (1996) *The NURBS Book*. Ed. Springer, EE. UU.

SÁNCHEZ PÉREZ, A. M., (1999) *Fundamentos de metrología*. Monografías del Departamento de Física Aplicada. Universidad Politécnica de Madrid, ETSII.

SÁNCHEZ, A. M., CARRO, J. (1996) *Elementos de metrología*. ETSII – UPM.

SÁNCHEZ PÉREZ, M. A., CARRO, J. (1985) *II Curso de especialización básica en calidad industrial*, ETSII-Madrid. Fundación Universidad-Empresa.

SÁNCHEZ PÉREZ, A. M., CARRO, J. (1980) *Consideraciones sobre los errores de medida*. Novamáquina 2000, Nov., n.º 62.

SEBASTIÁN, M. A. *Valores de la relación tolerancia/incertidumbre en procesos de medición*. Informe interno S/J-840701, ETSII-US, Sevilla (1984).

SEBASTIÁN PÉREZ M. A. (1995) *Asignatura: Metrología dimensional*, Programa de doctorado del Dpto. de Ingeniería de Construcción y Fabricación. Madrid.

SEVILLA HURTADO, L., MARTÍN SÁNCHEZ M. J. (2002) *Metrología dimensional*, Universidad de Málaga/ Manuales.

AUTORES VARIOS, *Glosario de términos empleados en metrología*. Comité de Metrología, AECC, Madrid (1976).

AUTORES VARIOS, (1996) *II Curso de especialización básica en calidad industrial*. Madrid. Fundación Universidad-Empresa. Ed. ETSII. UNED.

Monografía sobre regla de senos. Comité de metrología de la AECC, Asociación Española Para el Control de la Calidad, Madrid 1980.

Normas: Citadas en el texto.

Catálogos: Mitutoyo.

Evaluación de datos de medición – Guía para la expresión de la incertidumbre de medida. JCGM 100: 2008

Evaluación de Datos de Medición, Suplemento 1 de la «Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida». Propagación de incertidumbres aplicando el método de Monte Carlo.

Procedimiento DI – 001 para la calibración de Proyector de Perfiles, (CEM).