

Artículo técnico

En primera línea: guía para la selección del palpador de una MMC

Cuando decidimos la mejor manera de medir un componente en una máquina de medición de coordenadas (MMC), se seleccionan muchas opciones de forma predeterminada, debido a que han sido anteriormente cuidadosamente estudiadas muchas veces. La especificación de precisión la MMC, el sensor más apropiado (de contacto o de exploración) y el método de inspección óptimo a menudo se dan por sentado y no se cuestionan. Sin embargo, estos fundamentos de buena metrología pueden verse perjudicados por una inapropiada o precipitada elección del palpador, que hacen que pueda comprometerse la exactitud de la medida.



Cuando se evalúa cómo de precisa ha de ser la medida de una MMC, es una práctica común utilizar una relación de la incertidumbre de la MMC a la tolerancia de al menos 1:5 (lo ideal es de 1:10, aunque en muchos casos, es demasiado caro para ser práctico). Esta relación proporciona un margen de seguridad que asegura que los resultados tienen una incertidumbre relativamente pequeña comparada con el rango de variación esperado del componente. Siempre y cuando pueda mantenerse la relación de 1:5 con la tolerancia más pequeña, no hay razón para cuestionar la precisión.

Desafortunadamente, algo tan inofensivo como el cambio de palpador de una sonda puede, sorprendentemente, tener una gran influencia en la precisión real que puede conseguirse, provocando una apreciable variación de los resultados de las medidas. No es suficiente confiar en la calibración anual de la MMC para comprobar su precisión, puesto que esto solo confirma el resultado con el palpador utilizado en la prueba (normalmente uno muy corto). Es probable que sea el caso de mejor precisión. Para tener un conocimiento más completo de la precisión más probable de un rango amplio de medidas, necesitamos realizar una estimación de cómo el palpador contribuye a la incertidumbre de medida.



La especificación del palpador y la configuración pueden afectar a la precisión de los resultados de medida

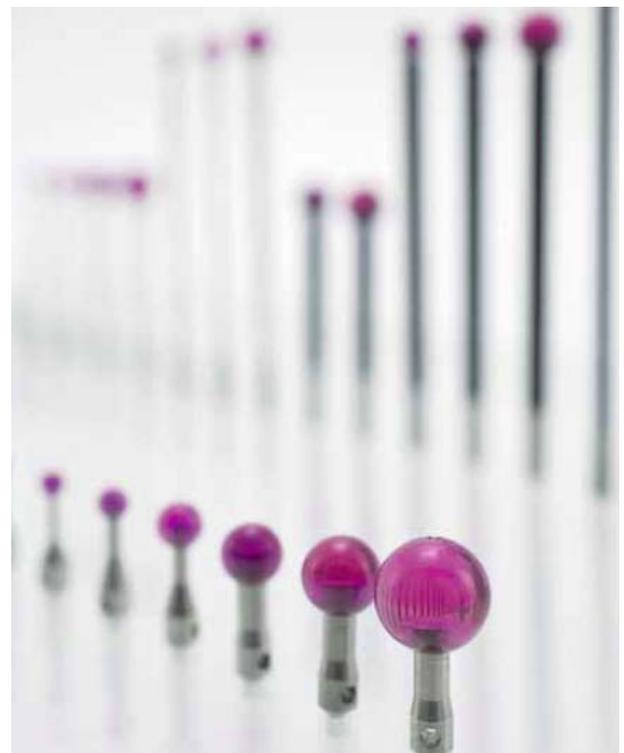
Este artículo considera cuatro aspectos principales de la elección del palpador que afectan a la precisión global de la MMC:

1. La esfericidad del palpador (redondez)
2. La flexión del palpador

3. La estabilidad térmica
4. La selección del material de la punta del palpador (aplicaciones de exploración)

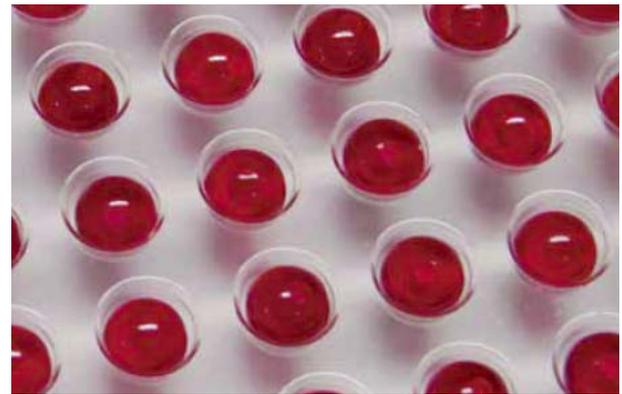
1. La esfericidad del palpador (redondez)

Las puntas de medida de la mayoría de los palpadores disponen de una bola, fabricada normalmente de rubí sintético. El error de esfericidad (redondez) de estas puntas será un componente de la incertidumbre de medida de la MMC, y es fácil perder hasta el 10% de la precisión de la MMC por este motivo.



Puntas de palpador esféricas de rubí

Las bolas de rubí se fabrican con varios niveles de precisión, definidos por su “grado”, relacionado con la máxima desviación de la bola con respecto a una esfera perfecta. Las dos especificaciones de bola que más se utilizan son el grado 5 y el grado 10 (cuanto más bajo es el grado, mejor es la bola). “Bajar” de una bola de grado 5 a una de grado 10 supone un pequeño ahorro en el coste del palpador, pero puede ser suficiente para amenazar la relación 1:5. El problema es que el grado de la bola es imposible de detectar visualmente, y obviamente no es evidente en los resultados de medida, lo que hace difícil calcular si es o no significativo. Una solución es especificar bolas de grado 5 como norma: cuestan un poco más, pero es un coste menor comparado con el posible coste de desechar una pieza buena, o peor aún, de dar por buena una que sea no conforme. Maliciosamente, cuanto más precisa es la MMC, más significativo es el efecto del grado de la bola. En las MMC con mejores especificaciones, puede perderse hasta un 10% de precisión por este motivo. Veamos un ejemplo...



2. La flexión del palpador

Cuando se utilizan sondas de disparo por contacto, como el estándar del sector TP20, es una práctica común cambiar entre módulos de palpador para aprovechar las ventajas de los diferentes palpadores, cada uno de ellos optimizado para una tarea de medición. La razón de que un palpador largo no se utilice en todas las aplicaciones es que hay una disminución de la precisión que aumenta cuanto mayor es la longitud del palpador. Es una buena práctica mantener el palpador tan corto y rígido como sea posible, pero ¿por qué?

Aunque el palpador no es directamente el responsable de este error concreto, lo amplifica con su longitud. El error se produce debido a la fuerza variable necesaria para disparar la sonda en las diferentes direcciones. La mayoría de las sondas no se disparan en el momento en que se produce el contacto entre el palpador y el componente, sino que necesitan que se produzca una fuerza que venza la carga del muelle que está dentro del mecanismo del sensor. Esta fuerza deforma elásticamente el palpador. Esta flexión permite que la sonda se mueva una pequeña distancia con respecto a la pieza después de que se produzca el contacto físico y antes de que se produzca el disparo. Este movimiento se conoce como *variación de desplazamiento*.

Un error de exploración típico según la ISO 10360-2 (MPE_p), establecido utilizando un palpador con una bola de grado 5:

- $MPE_p = 1,70 \mu m$

Esta figura se determina midiendo 25 puntos discretos que se han evaluado como 25 radios independientes. El rango de variación de los radios es el valor MPE_p . La redondez de la bola contribuye a esto directamente, y pasar de una bola de grado 5 a una de grado 10 incrementa este valor en $0,12 \mu m$ y en este ejemplo disminuye el error de exploración en un 7%:

- $MPE_p = 1,82 \mu m$

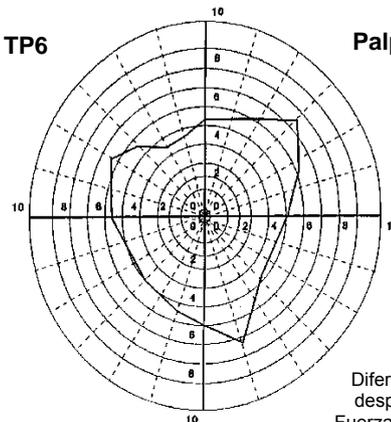
Nótese que la redondez de la bola del palpador también influye en el MPE_{THP} , que utiliza cuatro rutas de exploración sobre una esfera para evaluar las prestaciones de la sonda de exploración.

Notas:

- Esfericidad de la bola de Grado 5 = $0,13 \mu m$
- Esfericidad de la bola de Grado 10 = $0,25 \mu m$

Para las aplicaciones más exigentes, Renishaw ofrece una gama de palpadores con bolas de grado 3, que tienen una esfericidad de tan solo $0,08 \mu m$.

Sonda: TP6 Palpador: 50 mm



Escala en μm

Diferencia de variación de desplazamiento: $3,28 \mu m$
 Fuerza de disparo: 15 gramos
 Repetibilidad (2 sigma): $0,5 \mu m$

Ángulo de aproximación frente a la variación de desplazamiento necesaria para disparar una sonda de disparo por contacto TP6.

La disposición cinemática triangular de la mayoría de las sondas hace que sean necesarias diferentes fuerzas para producir un disparo. En las direcciones que ofrecen mayor rigidez, la sonda resistirá el disparo hasta que se produzca una flexión mayor del palpador. Esto implica que se producirá un desplazamiento mayor de la MMC, de modo que la variación de desplazamiento cambiará con el ángulo de aproximación (véase el gráfico que aparece a continuación). Esta diferencia de variación de desplazamiento se complica cuando se utilizan ángulos de aproximación compuestos (en los ejes X, Y y Z).



Los palpadores largos y las extensiones a menudo se fabrican de fibra de carbono para conseguir una rigidez y un peso óptimos

Para minimizar este efecto, todos los palpadores se calibran sobre una esfera de referencia de tamaño conocido antes de utilizarlos. Idealmente, este proceso determinaría los errores de cada combinación de palpador y ángulo de aproximación. En la práctica, se realiza un muestreo de los ángulos para ahorrar tiempo, se calcula un promedio y puede permanecer una pequeña proporción del error.

Es difícil calcular el efecto de esto sobre la incertidumbre de medida sin llevar a cabo pruebas empíricas. El punto clave a tener en cuenta es que cualquier error de diferencia de variación de desplazamiento se amplificará debido a la flexibilidad del palpador seleccionado. Esto enfatiza la importancia de la elección de los materiales durante el diseño del palpador, preponderando la resistencia a la flexión del vástago frente a otras características como su peso y su coste. Mientras que el acero es adecuado para muchos de los palpadores más cortos, presentando un módulo de Young de $E = 210 \text{ kN/mm}^2$, el material más rígido que se utiliza

comúnmente es el *carburo de tungsteno* ($E = 620 \text{ kN/mm}^2$), aunque éste es también denso y por ello raramente utilizado en los palpadores largos. En estos casos, la fibra de carbono proporciona una excelente combinación de rigidez ($E \geq 450 \text{ kN/mm}^2$) y peso ligero. Hasta el momento, los vástagos cerámicos ($E = 300 - 400 \text{ kN/mm}^2$) son utilizados a menudo en aplicaciones de inspección de máquinas-herramientas, en las que se valora su poco peso y su estabilidad térmica.

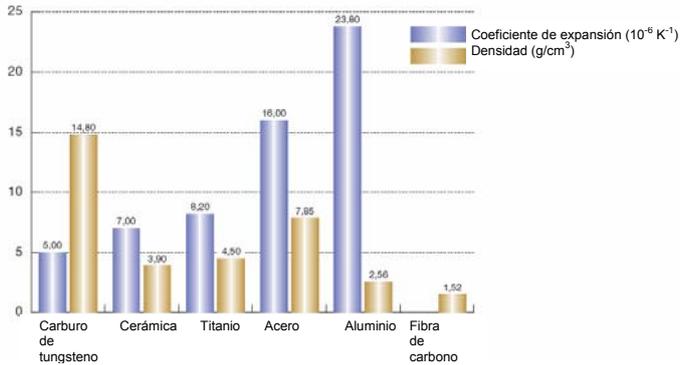
La rigidez del palpador también se ve afectada por las uniones de los ensamblajes de palpador. Como norma general, es mejor evitar las uniones siempre que sea pueda, dado que pueden introducir histéresis, aunque puede no ser posible si se utiliza un sensor fijo para medir piezas complejas. En estos casos, puede ser necesario crear una configuración a partir de una serie de palpadores, extensiones, conectores y codos. Una vez más, es importante considerar los materiales elegidos para cada elemento, puesto que tendrán un impacto sobre rigidez, el peso y la robustez de la configuración.



Las configuraciones complejas de palpador requieren una cuidadosa elección de los materiales si ha de mantenerse la precisión.

3. La estabilidad térmica

Las variaciones de temperatura pueden provocar serios errores de medida. Elegir el material adecuado para las extensiones de palpador puede proporcionar mayor estabilidad bajo condiciones cambiantes, produciendo resultados de medida más consistentes. Son preferibles los materiales con un bajo coeficiente de expansión térmica, especialmente si se utilizan palpadores largos, puesto que la dilatación térmica depende de la longitud:



Coefficientes de expansión térmica relativa y densidades de los materiales del vástago del palpador

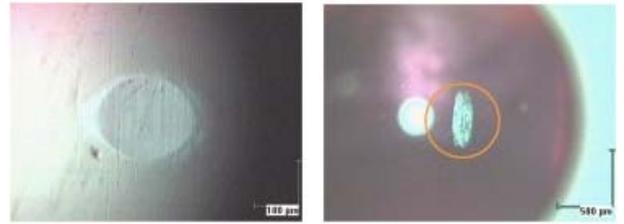
Como se indicó anteriormente, la fibra de carbono es el material más comúnmente utilizado para los palpadores largos y las extensiones, debido a que es rígida, ligera y a que no varía su longitud con la temperatura. Si se necesitan metales – para uniones, codos, etc. – el titanio proporciona la mejor combinación de resistencia, estabilidad y densidad. Renishaw suministra sondas y extensiones de palpador de ambos materiales.

4. Selección del material de la punta del palpador

En la mayoría de las aplicaciones, las bolas de rubí son la elección predeterminada para las puntas de palpador. Sin embargo, hay algunas circunstancias en las que otros materiales pueden ser una alternativa mejor.

En las mediciones de disparo por contacto, la punta del palpador solo entra en contacto con la superficie durante cortos periodos de tiempo y no hay movimiento relativo. La exploración es diferente, dado que la bola se desliza sobre la superficie del componente, produciéndose un desgaste por fricción. Este contacto prolongado puede, en circunstancias extremas, provocar la eliminación o deposición de material sobre la bola del palpador, lo que afecta a su esfericidad. Estos efectos aumentan si una zona de la bola está en contacto constante con la pieza. Renishaw ha realizado una extensa investigación sobre estos efectos, destacando dos diferentes mecanismos de desgaste:

- **Desgaste abrasivo**, que se produce cuando se explora una superficie, como hierro forjado, en la que diminutas partículas de residuo producen pequeños arañazos en el palpador y en la pieza, que hace que se forme una pequeña zona “plana” en la punta del palpador. Las resistentes puntas de óxido de circonio son la elección óptima para estas aplicaciones.



El desgaste abrasivo (izquierda) provoca la eliminación de material de la punta del palpador, mientras que el desgaste adhesivo (derecha) supone que el material de la superficie se deposita sobre la bola del palpador.

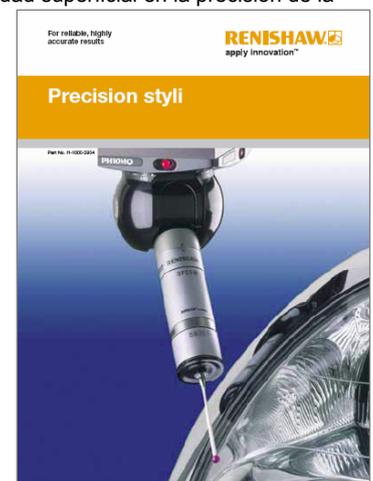
- **Desgaste adhesivo**, que se produce cuando la bola del palpador y el material del componente tienen una afinidad química entre sí. Esto puede observarse cuando se exploran piezas de aluminio con una bola de rubí (óxido de aluminio). El material pasa del componente, relativamente blando, al palpador, lo que produce un recubrimiento de aluminio de la punta del palpador que afecta una vez más a la redondez. En este caso, el nitruro de silicio es la mejor elección, puesto que presenta una buena resistencia al desgaste y no atrae el aluminio.

5. Otros factores

Otras consideraciones adicionales cuando se selecciona un palpador son:

- El tamaño de la rosca del palpador para que se adapte al sensor elegido
- El tipo de palpador – configuración recta, en estrella, articulada o personalizada
- El tipo de punta del palpador – bola, cilindro, disco, semiesfera
- El tamaño de la punta del palpador para minimizar el impacto de la rugosidad superficial en la precisión de la medida

Todos estos temas se analizan en detalle en el folleto de Renishaw *Palpadores de precisión* (documento H-1000-3304) que puede descargarse desde www.renishaw.es.



Conclusión

Los palpadores son un elemento crítico en cualquier medida, al proporcionar la interfaz crucial entre el sensor y el componente. Dan acceso a las características de la pieza y deben transmitir fielmente la ubicación de la superficie a la sonda. Para facilitar una inspección precisa, deben construirse con componentes de precisión, fabricados a partir de materiales que respondan a las necesidades del trabajo de medición. Si se selecciona con cuidado el palpador correcto, éste no añadirá una incertidumbre significativa, produciendo resultados consistentes y fiables. Si las tolerancias de la pieza son pequeñas y se necesitan palpadores largos, debe considerarse cuidadosamente el impacto de esta elección en la precisión.