

Efecto del recubrimiento de polvo mate sobre la precisión de la medición de una característica cónica mediante técnicas ópticas



Effect of the matte powder coating on the accuracy of the measurement of a conical characteristic by optical techniques



Agustín Arias, Rikardo Minguez, Eneko Solaberrieta, Nestor Goikoetxea, Jokin Gorozika, Egoitz Sierra y Javier Muniozgueren

Universidad del País Vasco UPV/EHU. Facultad de Ingeniería. Plaza Ingeniero Torres Quevedo, 1 - 48013 Bilbao (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8897> | Recibido: 04/07/2018 • Inicio Evaluación: 18/07/2018 • Aceptado: 30/11/2018

ABSTRACT

- Three-dimensional non-contact optical measuring systems, which project structured light patterns, are not only widely used to recover the real geometry of an object, but also in the area of quality control. In order to carry out a precise measurement with optical techniques, it is necessary to avoid reflections produced by the light falling on the metal part. For this, it is necessary to cover it with matte powder. The coating operation is, normally carried out manually by spraying the powder onto the work-piece. In particular, a spray with magnesium oxide powder has been used, achieving a thin and uniform fairly layer.

In general, the aim of this article is to evaluate the possibility of controlling the manufacturing tolerances achieved in machining processes by means of optical techniques. In particular, the purpose of this research article is to obtain information on the effect the powder coating in the precision of an angular measurement of a conical feature by means of 3D optical techniques using the ATOS II scanner. The part chosen to perform the study is a SK40 DIN2080 tool holder cone. A procedure is established to capture and measure the geometry of the part. Then, the measurements obtained are compared with the nominal dimensions and the accuracy and precision of the measurements are characterized. An estimation of the repeatability of the process is carried out. The results prove that the uncertainty in the controlled conical measurements remains limited. Finally, the influence of the applied matte coating in the systematic error is quantified, and some interpretations of the origin of the random error are proposed.

- **Keywords:** non-contact metrology, matte powder coating, repeatability of measurement, measurement of a conical feature.

RESUMEN

Los sistemas de medición tridimensional sin contacto ópticos, que proyectan patrones de luz estructurados, no sólo se utilizan ampliamente para recuperar la geometría real de un objeto, sino también en el área del control de calidad. Para realizar una medición precisa con técnicas ópticas es necesario evitar los reflejos producidos por la luz que incide en la pieza metálica. Para ello es necesario cubrirla con polvo mate. La operación de recubrimiento se lleva a cabo normalmente de forma manual, rociando el polvo sobre la pieza. En particular, se ha utilizado un spray con polvo de óxido de magnesio, logrando una capa fina y bastante uniforme.

En general, el objetivo de este artículo es evaluar la posibilidad de controlar las tolerancias de fabricación conseguidas en los procesos de mecanizado mediante técnicas ópticas. En particular, el objetivo de este artículo de investigación es obtener información sobre el efecto del recubrimiento en polvo en la precisión de una medición angular de una característica cónica por medio de técnicas ópticas 3D utilizando el escáner ATOS II. La pieza elegida para realizar el estudio es un cono portaherramientas SK40 DIN2080.

Se establece un procedimiento para capturar y medir la geometría de la pieza. A continuación, se comparan las medidas obtenidas con las dimensiones nominales y se caracteriza la exactitud y la precisión de las mediciones. Se realiza una estimación de la capacidad de repetición del proceso. Los resultados muestran que la incertidumbre en las mediciones cónicas realizadas permanece en valores aceptables. Finalmente, se cuantifica la influencia del recubrimiento mate aplicado en el error sistemático y se proponen algunas interpretaciones del origen del error aleatorio.

Palabras clave: metrología sin contacto, recubrimiento mate de polvo, repetibilidad de la medición, medición de una característica cónica.

1. INTRODUCCIÓN

Los sensores ópticos con tecnología láser y de luz estructurada determinan, mediante operaciones de triangulación matemática, las coordenadas de miles de puntos de una superficie de forma libre. Con esta técnica se puede capturar sin contacto la geometría de cualquier objeto físico, siendo para ello necesario procesar grandes volúmenes de datos a alta velocidad. Los sensores ópticos permiten diferentes aplicaciones que van desde la ingeniería inversa o retro-concepción [1, 2], hasta las reconstrucciones gráficas por ordenador (obras de arte, arquitectura, animación 3D, etc.), incluyendo la inspección continua de las especificaciones de fabricación en una línea de producción [3, 4].

Esta tecnología óptica, que amplía continuamente su campo de aplicación, es, en algunos casos, una alternativa posible a las máquinas de medición por coordenadas (MMC). Por ejemplo, se utiliza en la inspección de piezas con tolerancias de fabricación amplias (piezas de chapa o de plástico moldeado por inyección) u objetos que, por sus características (piezas flexibles, de gran tamaño y peso, o de geometría difícil), desaconsejan la inspección por métodos tradicionales basados en el contacto. Sin embargo, existen algunas limitaciones en el uso de dispositivos ópticos para la verificación de las medidas de fabricación. La razón principal de

estas limitaciones es la insuficiente caracterización de su exactitud, así como los errores y la incertidumbre de sus mediciones [5, 6].

Hay varios factores que afectan al proceso de medición, es decir, que afectan a la calidad y cantidad de los puntos obtenidos. Entre estos factores, caben destacar los siguientes: resolución y precisión del escáner, luz ambiental y características físicas de la superficie a capturar respecto a la luz incidente [7, 8]. El error de exploración volumétrica se puede dividir en dos categorías: error sistemático o de sesgo y error aleatorio. El error sistemático es un componente del error que se repite en mediciones sucesivas y que puede reducirse o compensarse utilizando algunos modelos matemáticos.

El error aleatorio en los datos escaneados ópticamente proviene de varias fuentes y es difícil de controlar. Una de las propiedades ópticas de las superficies que más influyen en la incertidumbre de la medición es la reflectividad. En piezas metálicas, la alta reflexión de las superficies impide una digitalización adecuada mediante técnicas de láser o de luz estructurada [9, 10]. Las técnicas de medición en 3D HDR (alto rango dinámico) se han desarrollado para satisfacer la necesidad de medir piezas metálicas con superficies brillantes en aplicaciones industriales. Hui et al. [11] y Shijie et al. [12] revisan varias técnicas HDR desarrolladas recientemente para la medición de superficies brillantes, comparando sus características y evaluando el estado actual de estas técnicas en esta área.

En cuanto a la exactitud y precisión de los sistemas de medición sin contacto, se han estudiado varios aspectos. Feng et al. [5] y Xi et al. [13] analizaron los errores de digitalización en los sistemas de digitalización láser 3D de alta velocidad. La geometría de la pieza y su posición dentro de la ventana de escaneo afectan a la precisión de la medición. Después de analizar el efecto de la profundidad del escaneo y el ángulo proyectado, se determinaron los componentes aleatorios y sistemáticos del error producido. Se concluyó que la variación de estos dos parámetros tiene poco efecto sobre el error aleatorio y una influencia más significativa en el error sistemático. Barbero y Ureta [14] realizaron un estudio comparativo de la precisión de varios sistemas de medición láser tridimensional. Concluyeron que los sistemas más precisos son aquellos que utilizan patrones de luz como el escáner ATOS.

Para evitar el problema de las reflexiones, las propiedades ópticas de las superficies se pueden modificar mediante la aplicación de capas finas de revestimiento antirreflejos de color. Sin embargo, estas capas cambian ligeramente la geometría del objeto medido. Brajljic et al. [15] examinaron las posibilidades de utilizar un escáner 3D para la inspección de las piezas fabricadas. Las mediciones se realizaron con el escáner ATOS II. La precisión y exactitud dimensional alcanzable de un escáner óptico fue probada a través de la exploración de varios bloques de control calibrados. Los bloques tenían superficies reflectantes antes de la aplicación de un recubrimiento en polvo mate de óxido de titanio (TiO₂). El objetivo de este artículo era analizar la viabilidad del uso del recubrimiento de polvo blanco y cuantificar su influencia en los errores sistemáticos y aleatorios utilizando un escáner de luz estructurada.

Otros autores [16, 17, 18] han investigado la influencia de los recubrimientos de polvo mate en la precisión de la medición óptica 3D. En estos estudios, las desviaciones respecto del valor nominal y la incertidumbre del proceso de medición se evalúan experimentalmente, con el sistema óptico ATOS Scan, utilizando diferentes recubrimientos de polvo mate de caliza y de óxido de titanio. Palousek et al. [18] evalúan el espesor medio de las capas utilizadas: 44 μ (con la tiza mate) y 5 μ (con la base de óxido de

titanio blanco), concluyendo que con la base de óxido de titanio (con un rango de recubrimiento aproximadamente diez veces menor que el de la tiza) se mejora considerablemente la precisión obtenida en la digitalización de la característica a medir.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. MATERIALES Y PROCESOS EMPLEADOS

La tarea experimental fue realizada con el hardware ATOS Compact Scan M5™, del fabricante GOM mbH de Braunschweig, Alemania [19], y el software de la misma empresa. El objeto de la prueba es un cono portaherramientas SK40 DIN 2080 (Fig. 1.-izda.).

Al principio de cada serie, la superficie cónica se limpia y luego se cubre con pintura en polvo (Fig. 1.-ctro.). Para obtener un espesor uniforme del revestimiento antirreflejos, se puede utilizar un aerógrafo para su aplicación. El spray antirreflejos para el escaneo láser 3D es una solución, normalmente a base de alcohol, de material en polvo, a menudo tiza o talco, polvo de óxido de titanio o polvo de óxido de magnesio. El spray antirreflejos de escaneo láser 3D de Helling (Helling GMBH) suele ser una de las opciones más utilizadas (es la que se utiliza en este experimento); este producto requiere la eliminación manual después de la digitalización 3D. Existen diferentes marcas de productos para polvos mate en spray: aerosol de ciclodecano (se evapora a las pocas horas de su aplicación); Magnaflux Spotcheck SKD-S2; Krylon Dulling spray; Kenro Kenair spray; Ardrex NQ1 spray, etc.

Por razones económicas, se limita el número de repeticiones de la prueba considerando el número suficiente para poder estudiar la incertidumbre requerida. Para analizar la capacidad de repetición del proceso se realizan siete series de mediciones de la característica cónica. Cada serie se compone de ocho muestras (ocho mallas o modelos poliédricos representando la superficie escaneada) de donde se extraen y miden de las características geométricas en evaluación.

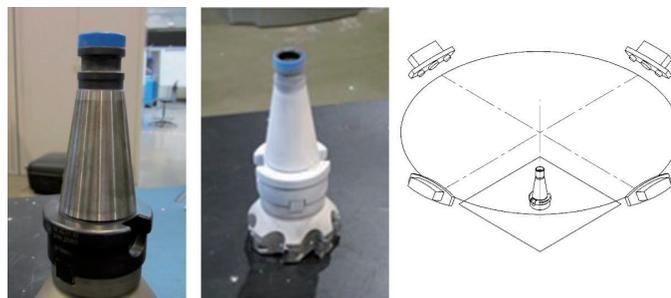


Fig. 1: Cono porta-herramientas SK40 DIN 2080 (izda.) - Recubrimiento de polvo mate (ctro.); Orientación de las sucesivas 'fotos' (dcha.)

Para cada serie, el proceso consistió en los siguientes pasos:

1. Recubrimiento de la superficie cónica (pulverizado del polvo).
2. Digitalización 3D (escaneo con el método de proyección de franjas). El cono SK40 se coloca en la mesa con su eje en posición vertical y se escanea desde 8 direcciones obtenidas girando el cono alrededor de su eje sucesivamente 90° (las posiciones cardinales N-E-S-W) e inclinando el eje del escáner respectivamente los ángulos de 60° y 120° medidos con respecto de la dirección vertical (Fig. 1.-dcha.).
3. Post-procesamiento y evaluación de las dimensiones.
4. Repetición (ocho veces) de los pasos 2 y 3.
5. Limpieza del recubrimiento de polvo mate.

Los experimentos se realizaron con un escáner óptico 3D, el ATOS Compact Scan M5™. La selección de las lentes siguió el criterio de buscar la mejor precisión con el volumen a medir y de acuerdo con VDI/VDE 2634, Parte 3 [20]. Las lentes MV150 pequeñas, con una distancia focal de 35 mm y un volumen de medición de 150 x 110 x 110 mm, proporcionan una resolución de 0,062 mm (distancia de separación entre los puntos de malla). El software utilizado es el propio del fabricante del hardware, el GOM Inspect V7.5 SR1™

2.2. PREPARACIÓN DEL OBJETO PARA SU MEDICIÓN

El cono SK40 se cubrió con una capa de polvo de óxido de magnesio (MgO) en forma de spray a base de alcohol (Developer U89, Helling GmbH, Hamburgo, Alemania). Se pulverizó a una distancia de unos 20 cm intentando cubrirlo con una capa homogénea observada a simple vista. Luego, el cono se colocó sobre una mesa con su eje en posición vertical. Se distribuyeron algunas pegatinas sobre la mesa portadora utilizadas por el sistema como puntos de control que facilitan el proceso de ajuste entre las sucesivas tomas de escáner o 'fotos' y optimizan el modelo resultante de su fusión. En la Figura 2 se detallan los parámetros principales de la parte cónica de un cono portaherramientas SK 40 DIN 2080 con sus valores nominales. Las especificaciones de fabricación del SK40 se incluyen en [21] y las tolerancias de las piezas cónicas en [22].

Se han considerado dos parámetros de control en la superficie cónica del cono portaherramientas: una medida angular (conicidad) y una medida lineal (diámetro del círculo en la sección central del cono). Ambas dimensiones se consiguen mediante un mecanizado muy preciso, ya que son fundamentales para asegurar un ajuste perfecto de la superficie cónica en su alojamiento. Por tanto, el estudio se limita a la verificación de la conicidad; se medirá el semi-ángulo en el vértice del cono (α) y el diámetro en la sección media (D3). Los valores nominales de los parámetros α y D3 se obtienen en las ecuaciones (1) y (2). Aunque el parámetro principal a verificar en este trabajo es la conicidad (mediante el ángulo α), también se midió D3 para comprobar el diferente impacto del recubrimiento de polvo mate en dos características geométricas de la pieza, una angular y otra lineal.

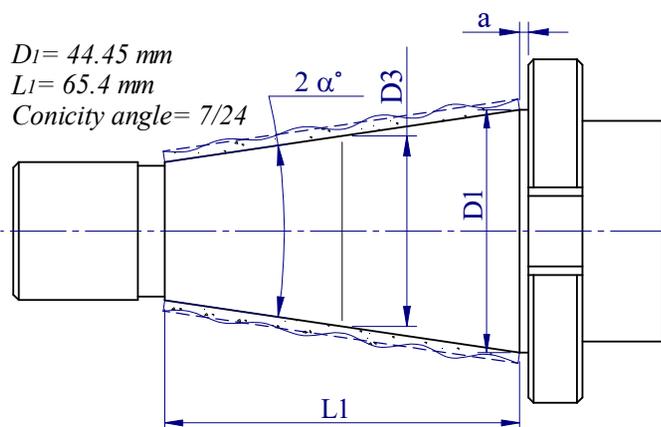


Fig. 2: Parámetros de la porción cónica sus valores nominales

El cono portaherramientas SK40 DIN2080 tiene tolerancias de fabricación muy restrictivas (\leq AT3). En concreto, la tolerancia de excentricidad radial es menor o igual a 3 μ m y la tolerancia angular es menor o igual a 8". Es por ello que, para este trabajo, se puede considerar que las dimensiones reales del cono coinciden con las dimensiones nominales.

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{7}{48}\right) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} = 8,2971^\circ \quad (1)$$

$$D3 = D1 - L1 \cdot \tan \alpha = 34,8443 \text{ mm} \quad (2)$$

2.3. DIGITALIZACIÓN

Durante las sucesivas sesiones de escaneo se observaron las siguientes variables de entorno (tabla 1: sección material suplementario): la temperatura se mantuvo en el rango de $20^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$, la iluminación se produjo con lámparas fluorescentes colocadas en el techo del laboratorio, y las vibraciones en las instalaciones se comprobaron con el software del escáner. Los experimentos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Diseño de Producto del Centro Académico por personal no especializado (estudiantes internos) que previamente habían recibido formación básica. El objetivo era evaluar la viabilidad industrial del proceso utilizando personal no altamente especializado. El técnico, que fue el mismo en todas las sesiones, recibió un curso elemental de 20 horas sobre el uso del hardware y el software, y tuvo una experiencia laboral de seis meses en el laboratorio de metrología. Cada una de las sesiones de escaneo comenzó con la calibración del escáner (tabla de calibración: GOM/CP40/MV 170 mm). Se realizaron siete series de mediciones y, en cada una de ellas, se obtuvieron ocho mallas completas de la pieza de trabajo (Figura 3).

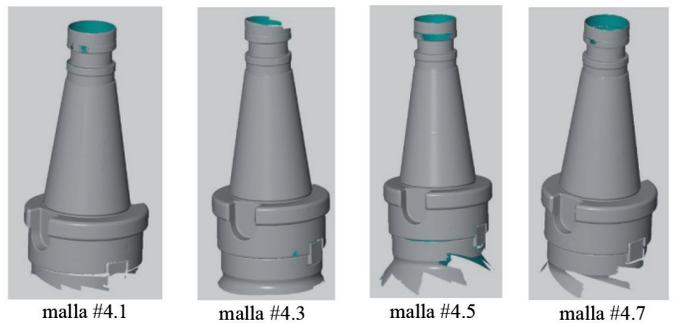


Fig. 3: Modelo digitalizado del cono SK40 (mallas núm. 1, 3, 5 y 7 de la serie 4º)

Para todas las series los parámetros de escaneo seleccionados para las mediciones fueron los mismos. La duración de la exposición fue la mínima admisible para evitar el problema de las vibraciones, mientras que la calidad y la resolución de la malla fueron las máximas. En las Tablas 2 y 3 (véase la sección: material suplementario) se indican los valores de los parámetros α y D3 obtenidos de las ocho mallas de cada una de las siete series de mediciones.

2.4. POSPROCESADO

Las mallas de puntos obtenidas, que representan la pieza, deben ser procesadas para generar elementos geométricos comparables a su diseño inicial (el modelo DAO nominal). En el posprocesamiento se generarán los planos, cilindros, conos, círculos... que mejor se adapten, mediante ajustes estadísticos (mejor ajuste Gaussiano - 3 sigma), a los subconjuntos de puntos extraídos de la nube escaneada.

Poligonización de las nubes de puntos y proceso de inspección

Utilizando el software ATOS, las nubes de puntos se transformaron en mallas poliédricas en formato STL. Las operaciones posteriores como la segmentación, ajuste y verificación se han rea-

lizado con las mallas originales (mallas 'en bruto'), sin realizarles ninguna modificación posterior, tales como el 'suavizado', relleno de agujeros, recortes, etc. El proceso de inspección se realizó con el software GOM Inspect, versión V7.5 SR1™. Las principales medidas se determinaron de la siguiente manera:

Conicidad (ángulo α°): Deberá seleccionarse una parte de la malla correspondiente al cono. Esta selección se puede hacer de diferentes maneras: selección manual; selección basada en una característica geometría cónica; selección basada en curvatura; selección basada en una geometría cónica nominal (un modelo DAO). En este caso, la selección se realizó utilizando el modo de selección manual (Fig. 4-arriba izda.); aunque la diferencia entre las mallas obtenidas, según que procedimiento se emplee, puede originar desviaciones de algunas milésimas de grado en la medición, estas variaciones no serán apreciables dentro del rango de precisión de las medidas inspeccionadas. Una vez seleccionada la parte cónica de la malla, se construyó el cono de ajuste (método: mejor ajuste Gaussiano; núm. de puntos: 3σ) y se obtuvo el ángulo de conicidad del cono mediante el comando de I-Inspect: 'comprobar ángulo' (Fig. 4-arriba dcha.). Esta medida se comparó con la medida nominal sin considerar su tolerancia de fabricación.

Diámetro de la sección media (D3): Se determina el plano sección medio orientado perpendicular al eje del cono de ajuste. Este plano dista $(0,5 \times L1 + a)$ del plano orientado perpendicular al eje del cono de ajuste que interpola los puntos del área circular de la corona en la base del cono. La distancia 'a' se calcula a partir del modelo poliédrico STL. Se determina la circunferencia de mejor ajuste al polígono resultante de cortar la malla por el plano sección medio (Fig. 4-abajo-izda.). Se obtiene la medida de su diámetro que se compara con el valor nominal sin tener en cuenta su tolerancia de fabricación (Fig. 4-abajo-dcha.).

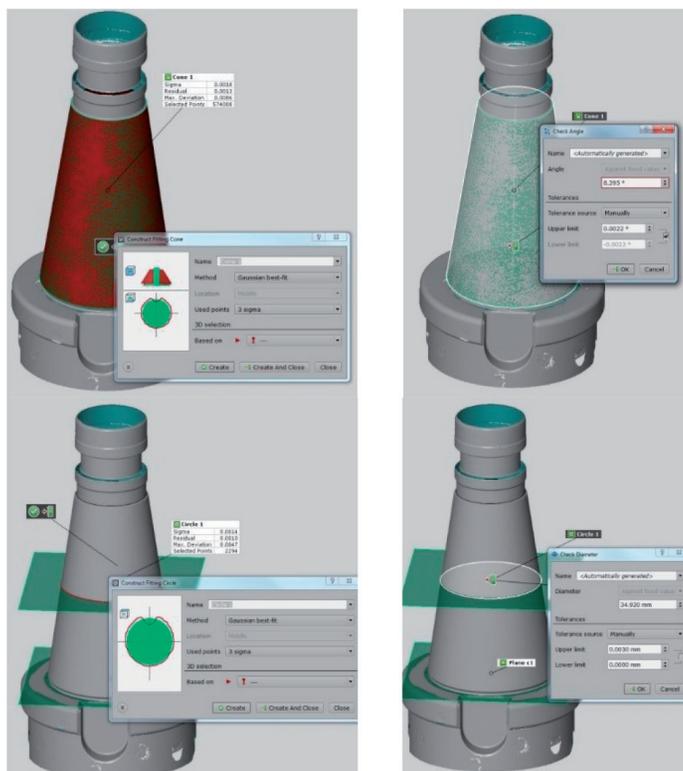


Fig. 4: Cono de ajuste (arriba-izda.); semi-ángulo en el vértice (arriba-dcha); circunferencia de ajuste (abajo-izda.); diámetro medio (abajo-dcha) (serie n°6 - medición n°4)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las Figuras 5 y 6 presentan los ocho valores obtenidos de D3 (diámetro de la sección media) y α (semi-ángulo en el vértice del cono) trazados para cada una de las siete series de medidas. Estos valores se compararon con los valores nominales respectivos (34,8443 mm y 8,2971°). En la Figura 5, los valores de D3 de la serie están bien agrupados y son equidistantes del valor nominal, por lo que el efecto de la capa de polvo de recubrimiento sobre la medición de esta distancia es relevante. En este caso, existe un posible error sistemático que estará relacionado con el espesor de la capa de polvo. En la figura 6, los valores de α de las series 1, 2, 6 y 7 se agrupan en torno al valor nominal, mientras que en las series 3, 4 y 5 se desplazan hacia valores superiores. Dentro de cada serie, se observa coherencia en los valores obtenidos. Del estudio de los gráficos se deduce que, en la inspección de la conicidad, la capa de polvo (su espesor y uniformidad) no tiene una influencia determinante en los resultados y no se puede distinguir un posible error sistemático.

3.1. VALORES ESTADÍSTICOS

La normalidad de las mediciones fue verificada por la prueba Shapiro-Wilk, que se realizó en cada una de las siete series de muestras de los valores α y D3, así como en las dos muestras formadas por los valores medios de cada serie. Aunque las muestras formadas por los valores de cada serie no siguieran una distribución normal, la muestra formada por sus valores medios tendería a seguirla. Estos resultados figuran en las Tablas 4, 5 y 6 (véase la sección: material suplementario). En todas las pruebas, los valores del parámetro 'p' fueron superiores al nivel alfa elegido (0,05), por lo que no se rechaza la hipótesis nula (H_0 : las series de datos están distribuidas uniformemente). Después de pasar la prueba Shapiro-Wilk, se puede suponer que las muestras de medición siguen una distribución normal, lo que permite estimar, con un cierto nivel de confianza, los errores que se producen con el procedimiento de verificación utilizado.

La incertidumbre en la medición obtenida mediante este procedimiento puede estimarse mediante intervalos de tolerancia estadísticos. Si la muestra es pequeña, como en este caso, lo mejor es utilizar un método paramétrico basado en la aproximación a la distribución normal. La incertidumbre de las mediciones repetidas puede evaluarse como una incertidumbre de tipo A (u_A) con la ecuación (3). A continuación, se presentan los valores estadísticos obtenidos para las dimensiones α y D3, así como los errores de las mediciones estimadas (tabla 7: véase sección de material suplementario, y tabla 8).

$$u_A = s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n(n-1)}} \quad (3)$$

El error detectado puede dividirse en dos: el error 'sistemático' y el error 'aleatorio'. El error 'sistemático' puede ser compensado.

	α (°)	D3 (mm)
Nominal	8,2971	34,8443
Media	8,3013	34,9369
Intervalo de confianza al nivel de 95%	8,2887	34,9138
Error sistemático	0,0041	0,0926
Error aleatorio +/-	0,0125	0,0230

Tabla 8: Errores estimados para las dimensiones α y D3

Para la dimensión α el error 'sistemático' es de $+0,0041^\circ$, mientras que el error 'aleatorio' inherente al procedimiento de medición, considerando el 95% de la población, es de $\pm 1,96 \sigma = \pm 0,0125^\circ$. El procedimiento utilizado para la medición de ángulos será válido para ángulos de conicidad con una tolerancia de fabricación superior a la tolerancia de la muestra. Si se asegura una distribución uniforme del recubrimiento de polvo blanco, éste no sería un obstáculo para la verificación de esta medida.

Para la dimensión D3 el error 'sistemático' es de $+0,0926 \text{ mm}$, mientras que el error 'aleatorio', inherente al proceso de medición, para el 95% de la población, es de $\pm 1,96 \sigma = \pm 0,0230 \text{ mm}$. La distribución del recubrimiento de óxido de magnesio en polvo utilizado, influye en la verificación de esta medida y constituye una parte sustancial del error 'sistemático'. El rango de variación del espesor del recubrimiento en polvo en las siete muestras puede estimarse por la semidiferencia entre los valores medios máximo y mínimo del diámetro D3 proyectada en dirección del eje sobre la dirección normal a la superficie del cono (ecuación 4).

$$\frac{1}{2} \cdot (D_3^{m\acute{a}x} - D_3^{m\acute{i}n}) \cdot \cos \alpha = \frac{1}{2} \cdot (34,956 - 34,926) \cdot \cos 8,2971^\circ = (4) = 0,0148 \text{ mm}$$

El valor medio del espesor del recubrimiento en polvo puede estimarse por la semidiferencia entre el valor medio y el valor nominal, proyectada en dirección del eje sobre la dirección normal a la superficie del cono (ecuación 5).

$$\frac{1}{2} \cdot (D_3^{mean} - D_3^{nominal}) \cdot \cos \alpha = \frac{1}{2} \cdot (34,9369 - 34,8443) \cdot \cos 8,2971^\circ = (5) = 0,0458 \text{ mm}$$

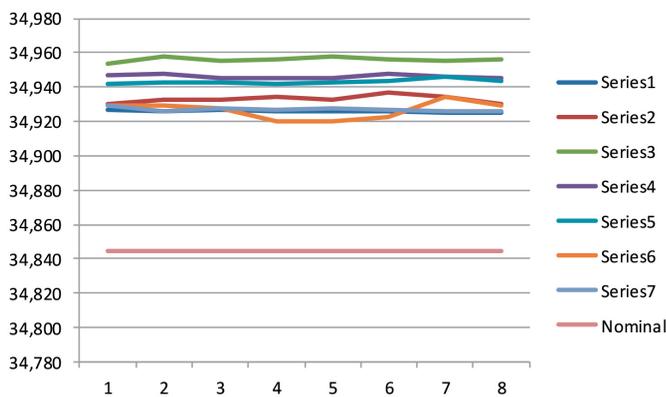


Fig. 5: Valores de D3 comparados con el valor nominal

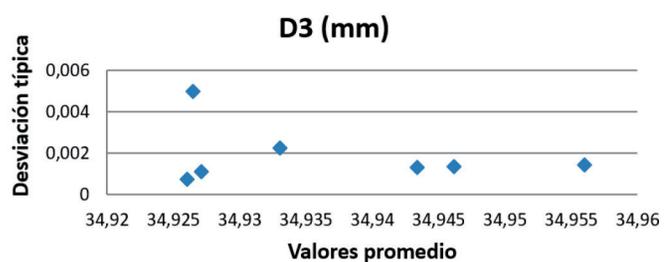
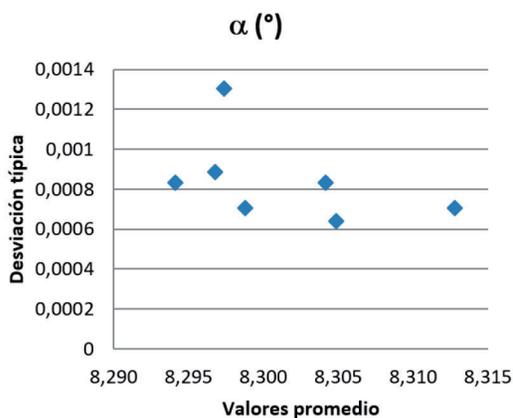


Fig. 7: Valores medios y varianzas de las medidas α y D3

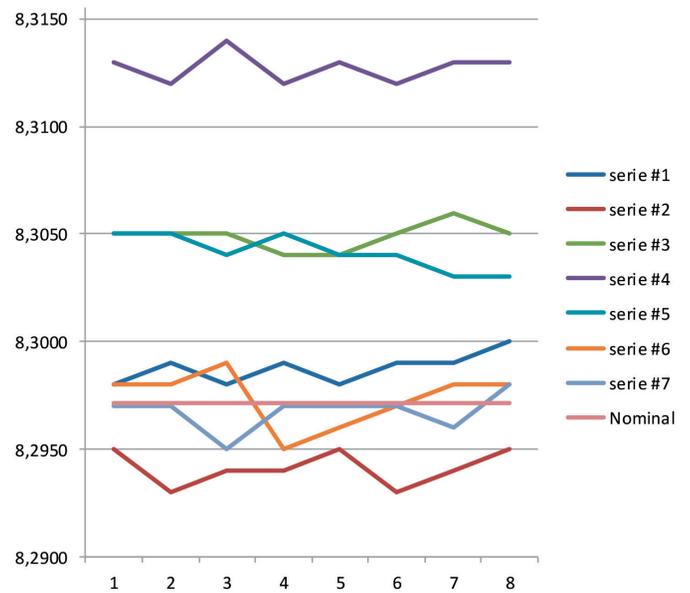


Fig. 6: Valores de α comparados con el valor nominal

3.2. ESTUDIO DE LA REPETIBILIDAD DEL PROCESO DE MEDIDA

En este apartado se analizan los valores medios y las desviaciones de las series de datos. Para probar la igualdad de las varianzas con muestras de ocho elementos, es posible utilizar tanto la prueba de Bartlett como la de Levene. Por un lado, la prueba de Bartlett funciona bien cuando el muestreo se realiza en poblaciones normales y la aproximación es buena para muestras muy pequeñas; además, no requiere que sus tamaños sean los mismos. Por otra parte, la prueba de Levene es insensible a la desviación de la normalidad, por lo que ofrece una alternativa más fiable que la prueba de Bartlett; es decir, con la prueba de Levene es menos probable que se rechace una verdadera hipótesis de igualdad de varianzas sólo porque las distribuciones de las poblaciones muestreadas no sean normales. Los gráficos de la figura 7 muestran los valores medios de las series y sus varianzas para las medidas α y D3.

La prueba de Bartlett, para las medidas de las siete series del semiángulo en el vértice del cono, da un valor de 'p' de 0,55 mayor que el nivel alfa elegido (0,05). Por lo tanto, no hay evidencia que conduzca al rechazo de la hipótesis nula de igualdad de varianzas. Esta misma prueba para el diámetro D3 da un valor 'p' de $3,26 \text{ E-}6$ menor que el nivel alfa elegido (0,05); por lo tanto, en este caso, se rechaza la hipótesis nula de igualdad de varianzas. La prueba de Levene para las medidas de las primeras seis series del ángulo

α da un valor de 'p' de $0,85 > 0,05$; por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula de igualdad de varianzas. La misma prueba para las medidas de las siete series de la distancia D3 da un valor 'p' de $0,006 < 0,05$; por lo tanto, en este caso, se rechaza la hipótesis nula de igualdad de varianzas.

4. CONCLUSIONES

En cuanto a la precisión de la medición, la influencia de la capa de revestimiento de polvo mate es mucho mayor en la medición lineal D3 que en la medición angular α . En el caso de la medición lineal D3, una parte significativa del error sistemático o sesgo, producido con el proceso de medición, es atribuible al espesor de la capa. El valor medio del espesor del recubrimiento en polvo puede estimarse en alrededor de 50 micras.

La influencia de la capa de revestimiento de polvo mate en la incertidumbre de la medición es pequeña. El error típico de la media (incertidumbre u_a) en las muestras de los valores medios de las siete series para α y D3, puede redondearse a los siguientes valores: $u_a(\alpha) = 2 \text{ min}$, y $u_a(D3) = 5 \text{ }\mu\text{m}$ (tabla 9; véase la sección: material suplementario). La incertidumbre de medición sigue siendo limitada dentro de unos rangos más estrechos que la tolerancia de fabricación de muchos procesos industriales.

En cuanto a la repetibilidad del proceso de medición, la influencia de la capa de polvo mate de recubrimiento es mayor en la dimensión lineal D3 que en la dimensión angular α . Con el procedimiento establecido para medir la dimensión angular, no se encuentra evidencia de que el proceso no sea repetible (es decir, la hipótesis nula H_0 se mantiene en la prueba de Barlett y Levene). En el caso de la cota lineal D3, con el procedimiento de medición establecido no se puede verificar la hipótesis nula H_0 , lo que significa que el proceso no puede considerarse repetible. Esto podría deberse al hecho de que el procedimiento utilizado requiere varios pasos intermedios para el cálculo de la dimensión lineal D3 (1- determinación del plano sección medio, 2- sección a la malla y 3- circunferencia de mejor ajuste), lo que produce un aumento en la variabilidad del proceso de medición.

La uniformidad y suficiencia de la capa de revestimiento anti-reflectante es importante, ya que una superficie insuficientemente mate puede provocar un aumento del ruido y errores de forma de los elementos inspeccionados. Sin embargo, muy a menudo, con una aplicación manual del recubrimiento mediante un spray, se pueden obtener resultados suficientemente válidos.

En conclusión, con la metodología y los procedimientos expuestos, es posible comprobar la conicidad o el ángulo del ápice de una superficie brillante cónica. Esta geometría aparece en numerosas piezas industriales que, en muchos casos, no requieren una alta tolerancia de fabricación. Para estos casos, los sistemas ópticos de medición tridimensionales sin contacto que utilizan patrones de luz estructurados, como el escáner 3D sin contacto ATOS, son una buena opción alternativa en el campo del control de calidad.

REFERENCIA

[1] Lai, X.; Lin, Z.; Huang, T.; Zeng, Z. A study of a reverse engineering system based on vision sensor for free-form surfaces. *Comput & Ind Eng.* 2001, 40 (3): 215-227. DOI. [http://dx.doi.org/10.1016-S0360-8352\(01\)00022-5](http://dx.doi.org/10.1016-S0360-8352(01)00022-5)

[2] Son, S.; Park, H.; Lee, K-H. Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection. *Int J Mach Tool Manu.* 2002, 42 (8): 889-897.

[3] Bi, Z.M. and Wang, L. Advances in 3D data acquisition and processing for industrial applications. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2010 26 (5): 403-413. DOI. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2010.03.003>

[4] Martinez, S.; Cuesta, E.; Barreiro, J.; et al. Analysis of laser scanning and strategies for dimensional and geometrical control. *Int J Adv Manuf Technol.* 2010 46 (5-8): 621-629. DOI. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-009-2106-8>

[5] Feng, H-Y.; Liu, Y.; Xi, F. Analysis of digitizing errors of a laser scanning system. *Precis Eng.* 2001 25 (3): 185-191. DOI. [http://dx.doi.org/10.1016/S0141-6359\(00\)00071-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0141-6359(00)00071-4)

[6] Mahmud, M.; Joannic, D.; Roy, M. et al. 3D part inspection path planning of a laser scanner with control on the uncertainty. *Comput Aided Design* 2011 43 (4): 345-355. DOI. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2010.12.014>

[7] Mian, S.H.; Mannan, M.A. et al. The influence of surface topology on the quality of the point cloud data acquired with laser line scanning probe. *Sensor Review* 2014 34 3: 255-265. DOI. <http://dx.doi.org/10.1108/SR-01-2013-611>

[8] Baribeau, R.; Rioux, M. Influence of speckle on laser range finders. *Appl Optics* 1991 30 (20): 2873-2878. DOI. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.30.002873>

[9] Gupta, M.; Agrawal, A.; Veeraraghavan, A. et al. (2012) A Practical Approach to 3D Scanning in the Presence of Interreflections, Subsurface Scattering and Defocus. *Int J Comput Vision* 2012 102 (1-3): 33-55. DOI. <http://dx.doi.org/10.7916/D82F7Z62>

[10] Gerbino, S.; Del Giudice, D. M.; Staiano, G. et al. On the influence of scanning factors on the laser scanner-based 3D inspection process. *Int J Adv Manuf Tech.* 2016 84 (9-12): 1787-1799. DOI. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-7830-7>

[11] Hui Lin; Jian Gao; Guanjin Zhang; Xin Chen; Yunbo He and Yan Liu. Review and Comparison of High-Dynamic Range Three-Dimensional Shape Measurement Techniques. *Hindawi. Journal of Sensors.* Volume 2017, Article ID 9576850, 11 pages, DOI. <http://dx.doi.org/10.1155/2017/9576850>

[12] Shijie Feng; Yuzhen Zhang; Qian Chen; Chao Zuo; Rubin Li; Guochen Shen. General solution for high dynamic range three-dimensional shape measurement using the fringe projection technique. *Optics and Lasers in Engineering* 59 (2014) 56-71.

[13] Xi, F.; Liu, Y. Et Feng, HY. Error Compensation for Three-Dimensional Line Laser Scanning Data. *Int J Adv Manuf Technol.* 2001 18 (3): 211-216. DOI. <http://dx.doi.org/10.1007/s001700170076>

[14] Barbero, B.R.; Ureta, E.S. Comparative study of different digitization techniques and their accuracy. *Comput Aided Design.* 2011 43 (2): 188-206. DOI. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2010.11.005>

[15] Brajlilh, T.; Tasic, T.; Drstvensek, I. et al. Possibilities of Using Three-Dimensional Optical Scanning in Complex Geometrical Inspection. 2011 *Stroj Vestn-J Mech E.* 57 (11): 826-833. DOI. <http://dx.doi.org/10.5545/sv-jme.2010.152>

[16] Radomir Mendricky. Determination of measurement accuracy of optical 3D scanners. *MM SCIENCE JOURNAL I* 2016 I december. DOI. http://dx.doi.org/10.17973/MMSJ.2016_12_2016183

[17] Dokoupil, F. Determination of the measurement error 3D optical scanner. Brno, 2013. Thesis. Brno University of Technology. Faculty of mechanical engineering. (in Czech)

[18] Palousek, D.; Omasta, M.; Koutny, D. et al. Effect of matte coating on 3D optical measurement accuracy. *Opt Mater* 2015 40: 1-9. DOI. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optmat.2014.11.020>

[19] GOM mbH, ATOS Triple Scan, Hardware User Manual.

[20] VDI/VDE 2634, Part 3 - Optical based 3D Measuring Systems, Multiple view systems based on area scanning.

[21] DIN 2080-1 - 7/24 Taper Shanks for Tools and Clamping Devices, Type A.

[22] ISO 1947:1973 - System of cone tolerances for conical workpieces.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quieren agradecer a la Universidad del País Vasco UPV/EHU (GIU15/22) la financiación de este trabajo de investigación.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

https://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/

