



Universidad de  
Oviedo



# **ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN.**

## **GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

### **ÁREA DE INGENIERÍA DE LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN**

**TRABAJO FIN DE GRADO N° 1601\_332**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE VERIFICACIÓN  
DIMENSIONAL DEL DESGASTE PARA HERRAMIENTAS DE  
CORTE BASADO EN HOLOGRAFÍA CONOSCÓPICA**

**DOCUMENTO N° 1  
MEMORIA**

**D. RUBINES SALDAÑA, Sergio  
TUTOR: D. BLANCO FERNÁNDEZ, David  
COTUTOR: D. ZAPICO GARCÍA, Pablo**

**FECHA: JULIO 2016**

# ÍNDICE MEMORIA

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Objetivos.....</b>   | <b>6</b>  |
| <b>2</b> | <b>Introducción teórica .....</b>   | <b>6</b>  |
| 2.1      | Interferometría .....   | 7         |
| 2.1.1    | Definición.....   | 7         |
| 2.1.2    | Interferómetro de Michelson .....   | 7         |
| 2.2      | Holografía.....   | 9         |
| 2.2.1    | Definición.....   | 9         |
| 2.2.2    | Holografía conoscópica .....  | 10        |
| 2.3      | Fenómenos y tipos de desgaste de las herramientas de corte .....  | 11        |
| 2.4      | Técnicas de medición del desgaste.....  | 17        |
| <b>3</b> | <b>Estado del arte .....</b>  | <b>18</b> |
| 3.1      | Norma ISO 3685. Tool-life testing with single-point turning tools.....                                  | 20        |
| 3.1.1    | Introducción .....  | 20        |
| 3.1.2    | Criterio de vida útil .....   | 20        |
| 3.1.3    | Medición del desgaste de herramientas .....   | 23        |
| 3.2      | Sistemas de Monitorización del Desgaste de Herramientas (SMDH). Estado actual de la investigación ..... | 24        |
| 3.2.1    | Métodos indirectos. Caracterización del desgaste On-Line.....   | 24        |
| 3.2.2    | Métodos directos. Caracterización del desgaste Off-Line.....  | 25        |
| 3.2.3    | Otras investigaciones de carácter general .....   | 42        |
| 3.3      | Investigaciones previas del <i>Área de Fabricación</i> .....  | 45        |
| 3.4      | Justificación del proyecto de investigación .....   | 48        |
| <b>4</b> | <b>Equipos y materiales utilizados durante la investigación .....</b>                                   | <b>49</b> |
| 4.1      | Definición de los parámetros de trabajo .....   | 49        |
| 4.2      | Equipos utilizados durante la investigación .....   | 51        |
| 4.2.1    | Máquina de Medición por Coordenadas (MMC) <i>Dea Swift</i> .....  | 51        |
| 4.2.2    | Sensor de distancia láser <i>ConoPoint-10</i> .....   | 60        |
| 4.2.3    | Lente del objetivo <i>ConoPoint-10</i> .....  | 64        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.2.4    | Otros equipos utilizados durante la investigación .....  | 64        |
| 4.3      | Utillajes disponibles en el laboratorio .....  | 65        |
| 4.4      | Plaquita de corte en torno <i>Sandvik</i> .....  | 67        |
| 4.5      | Portaherramientas <i>Sandvik</i> .....   | 68        |
| <b>5</b> | <b>Diseño del utillaje orientador.....</b>   | <b>69</b> |
| 5.1      | Dimensiones y características básicas del utillaje de la plaquita .....  | 69        |
| 5.2      | Primer diseño.....   | 70        |
| 5.2.1    | Componentes .....  | 70        |
| 5.2.2    | Ensamblaje.....  | 72        |
| 5.2.3    | Consideraciones.....   | 73        |
| 5.2.4    | Inconvenientes .....   | 74        |
| 5.3      | Segundo diseño.....  | 74        |
| 5.3.1    | Componentes .....  | 74        |
| 5.3.2    | Ensamblaje.....  | 77        |
| 5.3.3    | Consideraciones.....   | 78        |
| 5.3.4    | Inconvenientes .....   | 78        |
| 5.4      | Tercer diseño .....  | 79        |
| 5.4.1    | Componentes .....  | 79        |
| 5.4.2    | Ensamblaje.....  | 84        |
| 5.4.3    | Consideraciones.....   | 85        |
| 5.4.4    | Inconvenientes .....   | 86        |
| 5.5      | Cuarto diseño. Optimización del tercer diseño .....  | 86        |
| 5.5.1    | Componentes. Fabricación y referencias .....   | 86        |
| 5.5.2    | Ensamblaje.....  | 90        |
| 5.5.3    | Consideraciones.....   | 91        |
| 5.6      | Incorporación del utillaje orientador sobre la mesa de la MMC. Diseño de la placa de sujeción del utillaje ..... | 92        |
| <b>6</b> | <b>Prueba de funcionamiento y consideraciones generales.....</b>   | <b>95</b> |
| 6.1      | Prueba de funcionamiento del sistema .....   | 95        |
| 6.2      | Consideraciones generales .....  | 98        |
| <b>7</b> | <b>Proceso de calibración del sistema.....</b>   | <b>99</b> |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| <b>8</b>  | <b>Determinación del rango de ángulos bajo estudio .....</b>                             | <b>105</b> |
| 8.1       | Ángulo teórico máximo para la cara de desprendimiento .....                              | 105        |
| 8.2       | Ángulo teórico máximo para la cara de incidencia.....                                    | 112        |
| 8.3       | Rango de ángulos bajo estudio .....  | 112        |
| <b>9</b>  | <b>Caracterización de los parámetros de digitalizado .....</b>                           | <b>114</b> |
| 9.1       | Zonas de estudio sobre la cara de desprendimiento .....                                  | 115        |
| 9.2       | Búsqueda de la potencia óptima para la cara de desprendimiento.....                      | 117        |
| 9.3       | Zonas de estudio sobre la cara de incidencia .....                                       | 118        |
| 9.4       | Búsqueda de la potencia óptima para la cara de incidencia .....                          | 119        |
| 9.5       | Selección de la potencia de trabajo óptima .....   | 120        |
| 9.6       | Número mínimo de puntos a medir en cada posición .....                                   | 123        |
| <b>10</b> | <b>Determinación del ángulo de digitalizado óptimo .....</b>                             | <b>130</b> |
| 10.1      | Estrategia de digitalizado .....   | 130        |
| 10.1.1    | Estrategia de digitalizado para la cara de incidencia .....                              | 130        |
| 10.1.2    | Estrategia de digitalizado para la cara de desprendimiento.....                          | 132        |
| 10.1.3    | Consideraciones generales .....  | 133        |
| 10.1.4    | Cuadro de diálogo de control del ensayo.....   | 136        |
| 10.2      | Ensayos para la determinación del ángulo de digitalizado óptimo .....                    | 137        |
| 10.2.1    | Búsqueda del ángulo óptimo para la cara de incidencia.....                               | 138        |
| 10.2.2    | Búsqueda del ángulo óptimo para la cara de desprendimiento .....                         | 140        |
| 10.2.3    | Selección del ángulo de digitalizado óptimo .....  | 143        |
| 10.3      | Comprobación de la adecuación de los parámetros y el ángulo de digitalizado óptimos..... | 145        |
| <b>11</b> | <b>Diseño de un utillaje estático para el digitalizado en el ángulo óptimo .....</b>     | <b>148</b> |
| 11.1      | Primer diseño .....  | 149        |
| 11.2      | Segundo diseño. Optimización del primer diseño .....                                     | 149        |
| 11.2.1    | Utillaje estático .....  | 150        |
| 11.2.2    | Plaquita con geometría rompevirutas.....   | 155        |
| 11.2.3    | Tornillo de la plaquita .....  | 156        |
| 11.2.4    | Ensamblaje.....  | 156        |
| <b>12</b> | <b>Ensayos para la comprobación de la repetibilidad del utillaje estático .....</b>      | <b>158</b> |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 12.1      | Estrategia de digitalizado .....  | 159        |
| 12.2      | Procedimiento .....   | 162        |
| 12.3      | Comparación y análisis de resultados .....  | 165        |
| <b>13</b> | <b>Ensayos destinados a la medición del desgaste .....</b>                                      | <b>167</b> |
| 13.1      | Estrategia de digitalizado .....  | 167        |
| 13.2      | Ensayos sobre la plaquita intacta.....  | 172        |
| 13.3      | Simulación del desgaste mediante electroerosión sobre la plaquita .....                         | 175        |
| 13.3.1    | Ajuste de la máquina .....  | 178        |
| 13.3.2    | Puesta en marcha .....  | 183        |
| 13.4      | Ensayos sobre la plaquita desgastada. Electroerosión de 73 $\mu\text{m}$ .....                  | 184        |
| 13.5      | Ensayos sobre la plaquita desgastada. Electroerosión de 160 $\mu\text{m}$ .....                 | 186        |
| <b>14</b> | <b>Proceso de medición del desgaste.....</b>  | <b>187</b> |
| 14.1      | Desarrollo de un procedimiento para el procesado y comparación de las nubes de puntos.....      | 188        |
| 14.2      | Cálculo de la pérdida volumétrica de material .....   | 199        |
| 14.3      | Validación de los resultados obtenidos .....  | 201        |
| 14.3.1    | Generación CAD de la plaquita con geometría rompevirutas .....                                  | 201        |
| 14.3.2    | Comparación volumétrica de los distintos grados de desgaste y validación de los resultados..... | 207        |
| <b>15</b> | <b>Conclusiones e investigaciones futuras .....</b>   | <b>209</b> |
| 15.1      | Conclusiones.....   | 209        |
| 15.2      | Investigaciones futuras .....   | 210        |
| <b>16</b> | <b>Bibliografía .....</b>   | <b>212</b> |

# 1 Objetivos

La presente investigación consistirá en el desarrollo de un sistema de verificación dimensional del desgaste para herramientas de corte en torno basado en holografía conoscópica, es decir, se desarrollará y evaluará un procedimiento que permita caracterizar el desgaste de las herramientas a partir de información tridimensional obtenida sin contacto mediante un sensor láser.

En particular, el alcance del proyecto versará sobre la caracterización del desgaste de flanco o incidencia de herramientas con geometría rompevirutas y sin recubrimiento.

La herramienta de corte seleccionada para su análisis será sometida a diferentes tipos de ensayos. En todos ellos se tendrá control sobre el número de puntos y la extensión exacta de la zona a digitalizar (conocido a priori), por lo que la información obtenida es siempre muy semejante.

Se llevarán a cabo dos tipos de digitalizado. En el caso de los ensayos preliminares, es decir, los primeros ensayos de la investigación destinados a la determinación de las condiciones óptimas de digitalizado, se realizará un escaneado punto a punto. Por otro lado, en los ensayos finales destinados a la medición del desgaste, se realizará un escaneado en continuo sobre la superficie de la plaquita.

El equipo principal utilizado para la realización de los distintos ensayos consistirá en una Máquina de Medición por Coordenadas (MMC), la cual llevará integrado física y electrónicamente un sensor láser basado en la holografía conoscópica.

El procedimiento desarrollado permitirá determinar unos parámetros de trabajo y una orientación de la plaquita óptimos para el digitalizado de la cara de desprendimiento e incidencia.

Las nubes de puntos tomadas sobre la plaquita en los distintos grados de desgaste serán comparadas con la nube de puntos tomada sobre la plaquita antes de ser sometida a ningún tipo de desgaste.

La plaquita bajo estudio será sometida a una simulación de desgaste por electroerosión y el indicador de desgaste calculado consistirá en la pérdida volumétrica de material en una determinada zona de la plaquita.

## 2 Introducción teórica

Antes de proceder con la fase de diseño y la realización de los distintos ensayos necesarios para la investigación, se incluirá una introducción teórica que reúne información general sobre la materia directamente relacionada con el proyecto.

## 15 Conclusiones e investigaciones futuras

A continuación se expondrán las conclusiones extraídas del presente proyecto de investigación, así como los posibles trabajos futuros que puedan desarrollarse a partir del mismo.

### 15.1 Conclusiones

El procedimiento desarrollado en el presente proyecto de investigación consiste en un sistema de monitorización del desgaste de herramientas directo y Off-Line. Este procedimiento, el cual utiliza un sensor basado en Holografía Conoscópica integrado en una Máquina de Medición por Coordenadas, es válido para la representación tridimensional y medición del desgaste de flanco o incidencia sobre una plaquita rómbica de torneado con geometría rompevirutas y sin recubrimiento.

De acuerdo a la norma ISO 3685, el desgaste debe ser medido respecto al filo de corte principal de la plaquita intacta, aspecto que suele ser incumplido en los distintos métodos de caracterización de desgaste actuales, pero que sí permite el procedimiento planteado en este proyecto. El indicador utilizado para la evaluación del grado de desgaste fue la pérdida volumétrica de material en una determinada zona de la plaquita. El valor del indicador fue obtenido a través de la comparación de la geometría de la plaquita desgastada y la geometría de la plaquita antes de ser sometida a ningún tipo de desgaste (obtenidas ambas por digitalizado).

La geometría rompevirutas presente en la cara de desprendimiento de la herramienta hizo necesario realizar un estudio preliminar e independiente de la cara de desprendimiento e incidencia. De la misma forma, en el caso de la cara de desprendimiento fue necesario estudiar de forma independiente la zona central del filo y la zona de la esquina de corte. Los ensayos llevados a cabo permitieron determinar una orientación de compromiso de la plaquita para poder digitalizar las distintas zonas con una única configuración del sensor (potencia y frecuencia) y asegurando una calidad de los resultados suficiente.

Con el fin de validar el procedimiento desarrollado se realizó una emulación del desgaste de la plaquita durante el torneado por medio de electroerosión, comparando el valor del volumen desgastado obtenido del digitalizado (procesado de las nubes de puntos) con el valor del volumen perdido mediante simulación (intersección del volumen del electrodo con el modelo CAD de la plaquita intacta para una determinada profundidad de electroerosión).

El error máximo obtenido en la evaluación de los distintos grados de desgaste por Holografía Conoscópica fue del 5 %. Este pequeño de error permite la validación de los resultados obtenidos, así como la fiabilidad y precisión del método para la medición del desgaste.

Finalmente, a lo largo de la investigación se observaron diferentes factores tenidos en cuenta que podrían tener influencia en futuras investigaciones:

- Brillos. Los reflejos producidos cuando el spot láser incide sobre determinadas superficies pueden falsear las medidas tomadas por el sensor. Por esta razón se utilizarán rotuladores negros indelebles para pintar determinadas zonas de los utillajes diseñados.
- Limpieza. La presencia de suciedad, polvo u otras partículas sobre la superficie de la plaquita podrá alterar la medición esperada por parte del sensor, así como el correcto apoyo de la misma. Por ello, se cuidó la limpieza de la plaquita (retirando las posibles partículas depositadas sobre la superficie con un pincel y limpiando la superficie con un paño humedecido con alcohol) antes de proceder con los distintos ensayos.
- Temperatura. Las variaciones de la temperatura ambiente afectan al funcionamiento del sensor. Por esta razón, fue de vital importancia el arranque de la máquina unas horas antes del inicio de los ensayos y pruebas para ir calentando los accionamientos de la misma, así como la realización de los ensayos en el menor tiempo posible, de forma que no se produjeran variaciones importantes de la temperatura entre las distintas mediciones de un mismo ensayo.

## 15.2 Investigaciones futuras

Por último, se expondrán las posibles mejoras y complementos del método planteado a desarrollar en trabajos futuros:

- El presente proyecto de investigación se centra en la caracterización del desgaste de incidencia. Resultaría de interés la aplicación del método al análisis del desgaste de cráter generado sobre la cara de desprendimiento, la cual ya se tuvo en consideración para determinar los parámetros y ángulo de digitalizado óptimos.
- La zona de desgaste considerada en el presente proyecto no tiene en cuenta la zona del radio de punta de la herramienta (el desgaste por electroerosión al que fue sometida la zona del radio de punta en este caso no reproduce correctamente el desgaste generado en un proceso de torneado real) y el parámetro de desgaste medido fue la pérdida volumétrica de material de la plaquita. Una posible mejora del método presentado sería la consideración del radio de punta y la medición de otros indicadores de desgaste tales como el ancho del desgaste de flanco (VB), la profundidad del desgaste de cráter (KT) o la pérdida volumétrica de material en otras zonas determinadas de la plaquita.



- El procedimiento desarrollado para caracterizar el desgaste depende de diferentes acciones llevadas a cabo manualmente. La automatización del proceso completo sería crucial para su implantación en el entorno industrial.
- El método planteado consiste en un sistema de monitorización del desgaste de herramientas Off-Line, por lo que la investigación podría seguir su curso con la implementación del sistema de medición en un torno, de forma que el desgaste pudiera ser monitorizado a tiempo real, sin necesidad de analizar la plaquita en un equipo externo.
- La limpieza de la plaquita tiene una gran relevancia en la calidad y fiabilidad de los resultados obtenidos. Otra posible mejora sería la integración de un sistema de aire comprimido que eliminara cualquier tipo de suciedad o partículas depositadas sobre la superficie de la plaquita.
- Las medidas tomadas por el sensor se ven notablemente influenciadas por la temperatura ambiente. Con vistas a la implementación del método en una máquina de mecanizado, la implementación de un método de compensación de las variaciones de temperatura supondría una gran ventaja respecto al método desarrollado en este proyecto.

## 16 Bibliografía

### Normas, artículos y proyectos de investigación

- [1] ISO 3685:1993 (E) *Tool-life testing with single-point turning tools*, 2 ed., 1993.
- [2] R. J. Yang y S. C. Lina, «Force-based model for tool wear monitoring in face milling,» *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 35, nº 9, pp. 1201-1211, September 1995.
- [3] X. Q. Lia, Y. S. Wonga y A. Y. C. Neea, «Tool wear and chatter detection using the coherence function of two crossed accelerations,» *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 37, nº 4, pp. 425-435, April 1997.
- [4] Richard Y. Chiou y Steven Y. Liang, «Analysis of acoustic emission in chatter vibration with tool wear effect in turning,» *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, nº 7, pp. 927-941, May 2000.
- [5] P. C. Tseng y A. Chou, «The intelligent on-line monitoring of end milling,» *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, pp. 89-97, 2002.
- [6] M. Castejón, E. Alegre, J. Barreiro y L. Hernández, «On-line tool wear monitoring using geometric descriptions from digital images,» *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, pp. 1847-1853, 2007.
- [7] S. Kurada y C. Bradley, «A machine vision system for tool wear assessment,» *Tribology International*, vol. 30, nº 4, pp. 295-304, 1997.
- [8] Jeon-Ha Kim, Deok-Kyu Moon, Deuk-Woo Lee, Jeong-Suk Kim, Myung-Chang Kang y Kwang Ho Kim, «Tool wear measuring technique on the machine using CCD and exclusive jig,» *Journal of Materials Processing Technology*, Vols. %1 de %2130-131, pp. 668-674, 2002.
- [9] S. A. Khan, S. L. Soo, D. K. Aspinwall, C. Sage, P. Harden, M. Fleming, A. White y R. M'Saoubi, «Tool wear/life evaluation when finish turning Inconel 718 using PCBN tooling,» *Procedia CIRP*, vol. 1, pp. 283-288, 2012.
- [10] Chen Zhang y Jilin Zhang, «On-line tool wear measurement for ball-end milling cutter based on machine vision,» *Computers in industry*, vol. 64, pp. 708-719, 2013.
- [11] Enrique Alegre Gutiérrez, Joaquín Barreiro García, Ramón Ángel Fernández Díaz y Tomás Alonso Rodríguez, «Evaluación de la superficie de desgaste de plaquitas de

corte mediante imagen digital,» de *XXIV Jornadas de Automática*, León, 2003.

- [12] J. Jurkovic, M. Korosec y J. Kopac, «New approach in tool wear measuring technique using Cdd vision system,» *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, nº 9, pp. 1023-1030, July 2005.
- [13] Thomas R. Kurfess y Ty G. Dawson, «Quantification of tool wear using white light interferometry and three-dimensional computational metrology,» *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, nº 4-5, pp. 591-596, April 2005.
- [14] A. Devillez, S. Lesko y W. Mozer, «Cutting tool crater wear measurement with white light interferometry,» *Wear*, vol. 256, nº 1-2, pp. 56-65, January 2004.
- [15] R. F. Ávila, C. Godoy, A. M. Abrão y M. M. Lima, «Topographic analysis of the crater wear on TiN, Ti(C,N), and (Ti,Al)N coated carbide tools,» *Wear*, vol. 265, pp. 49-56, 2008.
- [16] W. H. Wang, Y. S. Wong y G. S. Hong, «3D Measurement of crater wear by phase shifting method,» *Wear*, vol. 261, pp. 164-171, 2006.
- [17] Anna Zawada-Tomkiewicz y Borys Storch, «Measurement of tool flank wear with the use of white light interferometer,» *PAK*, vol. 56, nº 8, pp. 950-953, 2010.
- [18] Luka Cerce, Franci Pusavec y Janez Kopac, «A new approach to spatial tool wear analysis and monitoring,» *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 61, pp. 489-497, 2015.
- [19] Jaime de Jesús Rezéndiz Pérez, Jonny Paul Zavala de Paz y Eduardo Castillo Castañeda, «Técnica de medición del desgaste de una herramienta de corte utilizando un sensor de desplazamiento láser,» *Scientia Et Technica*, vol. 17, nº 50, pp. 27-32, Abril 2012.
- [20] J. L. Cantero, J. Díaz-Álvarez, M. H. Miguélez y N. C. Marín, «Analysis of tool wear patterns in finishing turning of Inconel 718,» *Wear*, vol. 297, pp. 885-894, 2013.
- [21] A. Siddhpura y R. Paurobally, «A review of flank wear prediction methods for tool condition monitoring in a turning process,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 65, pp. 371-393, 2013.
- [22] S. Kurada y C. Bradley, «A review of machine vision sensors for tool condition monitoring,» *Computers in Industry*, vol. 34, pp. 55-72, 1997.

- [23] S. Dutta, S. K. Pal, S. Mukhopadhyay y R. Sen, «Application of digital image processing in tool condition monitoring: A review,» *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 6, pp. 212-232, 2013.
- [24] G. K. Iglesias Valdés, *Monitorización Off-Line del desgaste de herramientas de corte mediante digitalizado 3D*, 2012.
- [25] P. Zapico García, *Integración de sensores de holografía conoscópica en máquinas CNC para tareas de verificación e inspección*, 2014.
- [26] Hexagon Metrology, *Coordinate Measuring Machine Dea Swift User Manual*.
- [27] Optimet, *ConoPoint Series User Manual*, 7 ed., 2016.
- [28] Sandvik Coromant, *Mecanizado de Piezas Pequeñas*, 2016.

#### Sitios Web

- Web del fabricante de la plaquita y el portaplaquitas (*Acceso en Enero de 2016*): <http://www.sandvik.coromant.com/>
- Web del fabricante del sensor conoscópico y la lente del objetivo (*Acceso en Febrero de 2016*): <http://www.optimet.com/>
- Web de la empresa de metrología Taylor Hobson (*Acceso en Febrero de 2016*): <http://www.taylor-hobson.com/>
- Web de la empresa de sistemas adaptativos e inteligencia artificial SABIA (*Acceso en Febrero de 2016*): <http://sabia.tic.udc.es/>
- Portal de publicaciones científicas (*Acceso en Marzo de 2016*): <http://www.sciencedirect.com/>