

Análisis comparativo de herramientas avanzadas para el torneado de superaleaciones

A. Fernández-Valdivielso⁽¹⁾, A. Rodríguez-Ezquerro⁽¹⁾, G. Urbicain⁽¹⁾, L.N. López de Lacalle⁽¹⁾, I. Zamakona⁽²⁾, M. Esparta⁽²⁾

(1) Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad del País Vasco (UPV/EHU)
asier.fernandezv@ehu.es

(2) ITP® (Industria de Turbo Propulsores)

El mecanizado de aleaciones termoresistentes supone un reto en comparación con otros materiales. El desgaste de herramienta en este tipo de materiales resulta decisivo y sus consecuencias deben controlarse dentro de un rango para mantener la pieza final en tolerancias. Como consecuencia del desgaste experimentado por la herramienta en el proceso de torneado, se producen cambios en su geometría que afectan a distintos aspectos del proceso como son el vector de fuerza de corte, la rugosidad de la pieza o la formación y evacuación de la viruta.

En el presente artículo, se estudian bajo idéntico material, geometría y condiciones de corte, diferentes calidades de herramientas de las marcas comerciales más relevantes a nivel mundial, todas ellas recomendadas para el mecanizado de aleaciones de base níquel, con objeto de evaluar y caracterizar su comportamiento ante el desgaste y rugosidad superficial generada en la pieza. En el estudio, se detecta de las características que más influencia tienen en el rendimiento de los insertos, tipo de metal duro, recubrimiento y geometría del filo de corte.

1. INTRODUCCIÓN

El mecanizado de aleaciones termoresistentes supone uno de los mayores retos para el mecanizador puesto que se trata de materiales de alta energía específica de corte. Esta baja maquinabilidad resulta muy agresiva para la herramienta por lo que las condiciones de corte deben ser cuidadosamente seleccionadas de cara a optimizar el compromiso entre productividad y vida de herramienta. Las propiedades responsables de la baja maquinabilidad de las aleaciones base níquel, en particular del Inconel 718 son [1, 2]:

- La resistencia del material se mantiene durante la operación de corte debido a sus magníficas propiedades mecánicas a alta temperatura.
- la presencia de partículas de carburos en su microestructura son las causantes de un desgaste por abrasión de la herramienta de corte
- tendencia al endurecimiento por deformación plástica de superficie de la pieza, lo que conduce al desgaste de la herramienta en forma de entalla
- la baja conductividad térmica del material conduce a temperaturas por encima de los 1200°C en la cara de desprendimiento
- las superaleaciones de base níquel tienen una alta afinidad química con muchos de los materiales de la herramienta, provocando un desgaste por difusión
- la generación de microsoldaduras y adhesión de la aleación de níquel en la herramienta ocurren frecuentemente durante el mecanizado, causando desgaste en entalla y alteraciones de la geometría de la cara de desprendimiento, sobre todo en forma de cráter.
- Debido al alto valor de resistencia del material, las fuerzas de corte son a su vez elevadas, excitando al sistema máquina herramienta provocando vibraciones que se reflejan en la superficie de la pieza.

La baja maquinabilidad de las aleaciones de níquel se pueden resumir en dos problemas básicos: vida muy corta de la herramienta de corte y

La generación de calor y la deformación plástica inducida durante el mecanizado afectan a la superficie de la pieza, en concreto a la microestructura de la aleación, en la que se introducen tensiones residuales, generación de grietas y alteraciones microestructurales, así como variación de la microdureza de la zona afectada. Las tensiones residuales afectan particularmente en la vida a fatiga de la pieza mecanizada, aspecto especialmente crítico en piezas del sector aeronáutico que deben tener un excelente comportamiento a fatiga. Por otro lado la existencia de tensiones residuales son responsables en la mayoría de las ocasiones de errores dimensionales que originan importantes problemas a la hora del ensamblaje con el resto de componentes, este fenómeno es más significativo en piezas de pared delgada [3,4].

Por tanto, se debe extremar el cuidado a la hora mecanizar con el fin de garantizar la integridad superficial del componente. Los parámetros más importantes a controlar son la elección del material de la herramienta, el recubrimiento a proporcionarla, la geometría de corte, la estrategia de mecanizado, de la velocidad de corte, el avance por revolución, la profundidad de pasada, la lubricación empleada [5, 6, 7]. Todos estos parámetros han de ser evaluados para lograr un incremento de la vida de la herramienta a fin de mecanizar el material con un filo en correcto estado y conservar de esa manera la integridad superficial de la pieza mecanizada [4].

En el trabajo aquí presentado, se hace una evaluación de los insertos de metal duro que en la actualidad ofrecen los más significativos proveedores de herramientas del mercado. Todas las plaquitas experimentadas son recomendadas en su catálogo comercial correspondiente para el mecanizado de superaleaciones, por la idoneidad de la calidad de metal duro, de recubrimiento y de geometría de rompevirutas para aleaciones de base níquel.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los ensayos con los diferentes tipos de plaquitas que dan sentido al núcleo de este trabajo, han sido realizados en un centro de torneado de la marca CMZ[®] modelo TC25BTY, para su gobierno está dotado de un control numérico de marca Fanuc[®] tipo 31iT HVi. Las probetas, de forma cilíndrica, con diámetro inicia de 75mm y 400mm de longitud, se han realizado en Inconel 718 precipitado según norma AMS 5663, alcanzando tras el tratamiento térmico una dureza comprendida entre 44 - 46HRC, la composición química del material se recoge en la siguiente tabla.

C	S	Mn	Si	Cr	Mo	Co	Ti	Al
0.024	0.0004	0.07	0.8	17.95	2.89	0.18	1	0.49
B	Zr	Fe	Cu	Ni	P	Cb	Ta	W
0.004	<0.01	18.03	0.04	53.83	0.009	5.2	<0.01	0.03
V	Cb+Ta	Ti+Al	Ni+Co	Bi	Ca	Pb	Mg	Se
0.03	5.2	1.49	54.01	<0.00001	<0.001	<0.0001	<0.0008	<0.00005
Ag	Sn	O	N					
<0.0001	0.0011	<0.0005	<0.0054					

Tabla 1. Composición de la aleación de base níquel empleada en el estudio

A la hora de definir la plaquita de corte se seleccionó una geometría estándar, DNMG 150612, de empleo habitual en operaciones de semiacabado y acabado, asegurando de esta forma la existencia en la totalidad de los catálogos de proveedores de herramientas. Las características principales según designación ISO para este tipo de insertos son: forma rómbica de 55°, ángulo incidencia a 0°, longitud de filo de 15mm y con radio de punta de 1.2mm. En lo que se refiere al resto de características del inserto, como son geometría del rompevirutas y calidad (binomio entre metal duro y recubrimiento) se deja a la elección del técnico de cada marca comercial respectivamente. En la tabla 2, se expone el total de las plaquitas analizadas y la nomenclatura empleada. Para la medición de las principales características de la geometría de corte se empleó un microscopio confocal Leica DCM 3D,

para que las medidas fueran aceptadas, debían proporcionar más del 98% de puntos medidos.

Proveedor	Preparación	Calidad	Referencia	Tipo sustrato	Recubrimiento
Prov. 01	Prep. 01	Cal. 01	01-01-01	micrograno	CVD multicapa TiCN-Al ₂ O ₃ -TiN
	Prep. 02	Cal. 01	01-02-01	micrograno	CVD multicapa TiCN-Al ₂ O ₃ -TiN
	Prep. 01	Cal. 02	01-01-02	micrograno	PVD AlTiN
Prov. 02	Prep. 01	Cal. 01	02-01-01	grano medio	CVD TiCN-Al ₂ O ₃
	Prep. 02	Cal. 01	02-02-01	grano medio	CVD TiCN-Al ₂ O ₃
	Prep. 03	Cal. 01	02-03-01	grano medio	CVD TiCN-Al ₂ O ₃
Prov. 03	Prep. 01	Cal. 01	03-01-01	micrograno	PVD TiAlN Nano
Prov. 04	Prep. 01	Cal. 01	04-01-01	micrograno	PVD AlTiN-Al ₂ O ₃
Prov. 05	Prep. 01	Cal. 01	05-01-01	micrograno	PVD multicapa de TiAlN-AlCrN
	Prep. 02	Cal. 01	05-02-01	micrograno	PVD multicapa de TiAlN-AlCrN
	Prep. 01	Cal. 02	05-01-02	micrograno	PVD multicapa de TiAlN-AlCrN
Prov. 06	Prep. 01	Cal. 01	06-01-01	micrograno	PVD TiAlN
Prov. 07	Prep. 01	Cal. 01	07-01-01	submicrograno	PVD TiAlN
Prov. 08	Prep. 01	Cal. 01	08-01-01	grano fino	PVD AlTiN
	Prep. 02	Cal. 02	08-02-02	micrograno	CVD multicapa TiCN-Al ₂ O ₃ -TiN
Prov. 09	Prep. 01	Cal. 01	09-01-01	grano fino	CVD multicapa de TiCN-Al ₂ O ₃
Prov. 10	Prep. 01	Cal. 01	10-01-01	micrograno	PVD multicapa de TiAlN

Tabla 2. Información comercial del tipo de metal duro y recubrimiento de las referencias estudiadas

La denominación del portaherramientas empleado para la totalidad de los ensayos es DDJNR 2525 M15, que proporciona a la plaquita de corte un ángulo de posición de 93°, ángulo de desprendimiento principal y secundario de 6° negativos y un ángulo de incidencia de 6°. Este tipo de cuadradillo dispone de amarre por brida que asegura la repetitividad del posicionamiento de la plaquita.

Para la medición de desgaste en incidencia se empleó un lapa micrométrica de la marca Mitutoyo modelo TM-500. La rugosidad fue medida en la superficie de la probeta a pie de máquina mediante el empleo un rugosímetro portátil de la marca Taylor Hobson, modelo Surtronic Duo, con un filtro gaussiano de cut-off igual a 0.8mm capaz de medir Ra entre 0.1 y 40µm.

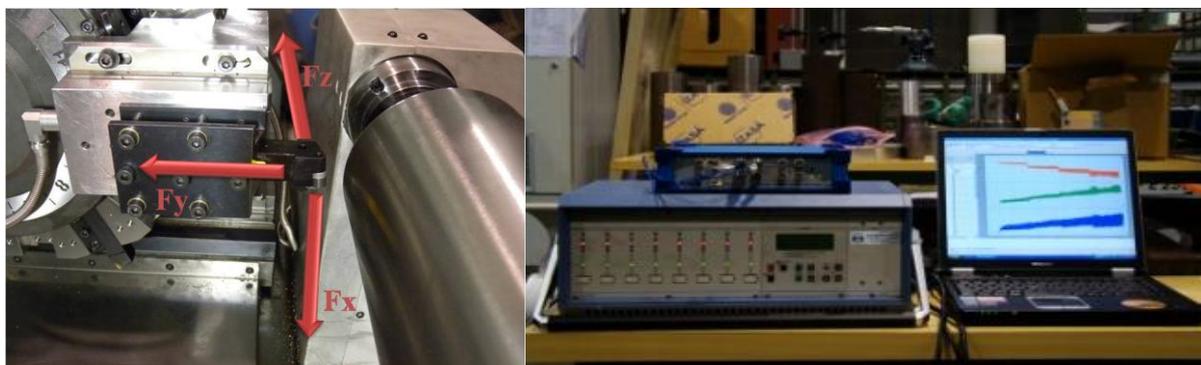


Figura 1. Montaje experimental y sistema de adquisición de datos

Para la adquisición, grabación y posterior análisis de las fuerzas de corte experimentales, se dispuso de un sistema compuesto principalmente por un dinamómetro Kistler® modelo 9257B, conectado a un amplificador de señal tipo 5017, como se muestra en la Figura 1. El procesamiento y manipulación de los datos se lleva a cabo mediante un analizador multicanal OROS gobernado por el software GATE NV 6.2 desde un PC.

La elección de los parámetros de corte se basó en trabajos previos sobre daño del material, en los que se valora la introducción de tensiones residuales y alteraciones microestructurales [8].

Condiciones de corte	Vc [m/min]	f [mm/rev]	ap [mm]	Q [cm ³ /min]	Ra _{teórica}
	70	0.25	0.6	10.5	1.63
Características sistema sujeción					

Tabla 3. Parámetros y sistema de sujeción empleado en el estudio

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1 Caracterización del desgaste

La evaluación del rendimiento de los insertos se llevó a cabo mediante la cuantificación del desgaste en incidencia, poniendo el criterio de parada según lo indicado en la norma ISO 3685:1993, que especifica un $VB_{m\acute{a}x}$ igual 0.3mm, de forma que el ensayo de detiene cuando se supera ese valor o se produce la rotura del inserto.

Cada inserto se ensayó dos veces. Se ejecutaron pasadas de cilindrado midiendo al final de cada pasada el desgaste en incidencia producido por abrasión, la aparición de desgaste por entalla, observando la evolución del cráter, la existencia de interacción entre el retraso de filo y el cráter y la aparición de material adherido al filo de corte.

En la gráfica de la izquierda de la figura 2, se recoge la evolución del desgaste en incidencia en función del tiempo de mecanizado, volumen de material evacuado y longitud de contacto. Para su cálculo se considera el diámetro inicial y final de la probeta, así como la longitud cilindrada.

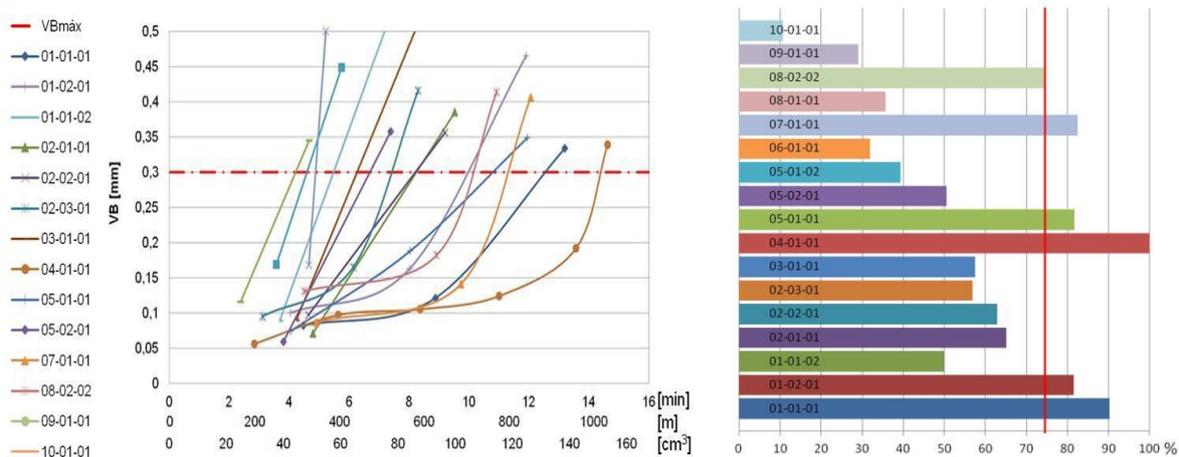


Figura 2. Izq) Evolución del desgaste en incidencia frente al tiempo de mecanizado, longitud de contacto y volumen de material arrancado. Dch) Rendimiento de las distinta referencias evaluadas

En la gráfica de la derecha de la figura 2, se representa el rendimiento de las plaquitas evaluadas. Se otorga un rendimiento del 100% a la plaquita cuyo tiempo de mecanizado ha sido mayor, plaquita de referencia 04-01-01, poniendo en función de ésta el rendimiento del resto de insertos experimentados. La línea roja representa un rendimiento del 75%, de tal

forma que todos los insertos que superan este límite, son susceptibles de ser empleados en el proceso productivo y objeto de análisis en futuros trabajos.

3.2 Rugosidad superficial

La medición del parámetro de rugosidad $Ra[\mu\text{m}]$ se realizó sobre la probeta, en tres sectores a lo largo de su longitud, inicio, medio y final de la pasada. Con estos valores se realizó la media de la rugosidad de la pasada de cilindrado. Este valor de rugosidad se hizo coincidir en el tiempo con las mediciones de desgaste de las plaquitas. En la gráfica de la izquierda de la figura 3 se reflejan los resultados de rugosidad obtenidos frente al tiempo de mecanizado, longitud de contacto y volumen de material arrancado. Tomando como referencia el valor de rugosidad teórica, calculado según la expresión (1), se observa que hay una gran dispersión en los resultados generados por los distintos insertos evaluados. Se pueden separar en tres grupos: un primer grupo de insertos que desde un inicio proporcionan una rugosidad superior a la teórica. Un segundo grupo de insertos generan una rugosidad cercana a la teórica, que a medida que el desgaste aumenta, el valor de rugosidad disminuye. Por último se observan resultados por debajo de la $Ra_{\text{teórica}}$ y que como consecuencia del desgaste en incidencia, la rugosidad disminuye de valor.

$$Ra_{\text{teórica}} \approx \frac{f^2}{32 \cdot r_e} \quad (1)$$

Es necesario apuntar que cuando el desgaste del inserto se aproxima al valor crítico, cercano a $VB=0.25\text{mm}$ en la mayoría de los insertos evaluados, se produce un aumento súbito del valor de rugosidad, alejándose del valor teórico.

En la gráfica de la derecha de la figura 3, se representa la variación de la rugosidad media de cada inserto a lo largo de todo el ensayo de desgaste, frente al valor de rugosidad teórica. Los valores de $\Delta Ra_{\text{teórica}}[\mu\text{m}]$ negativos corresponden a los insertos cuya rugosidad se ha encontrado por debajo de la teórica y los positivos por encima de ésta. La línea roja representa la franja de aceptación del valor medio de rugosidad, valorado en este caso como $0.05\mu\text{m}$ por encima del valor teórico ($Ra_{\text{lim}}=1.68\mu\text{m}$). Por consiguiente, todos los insertos cuyo valor de rugosidad media se encuentra a la izquierda del valor límite, son susceptibles de proporcionar la rugosidad demandada.

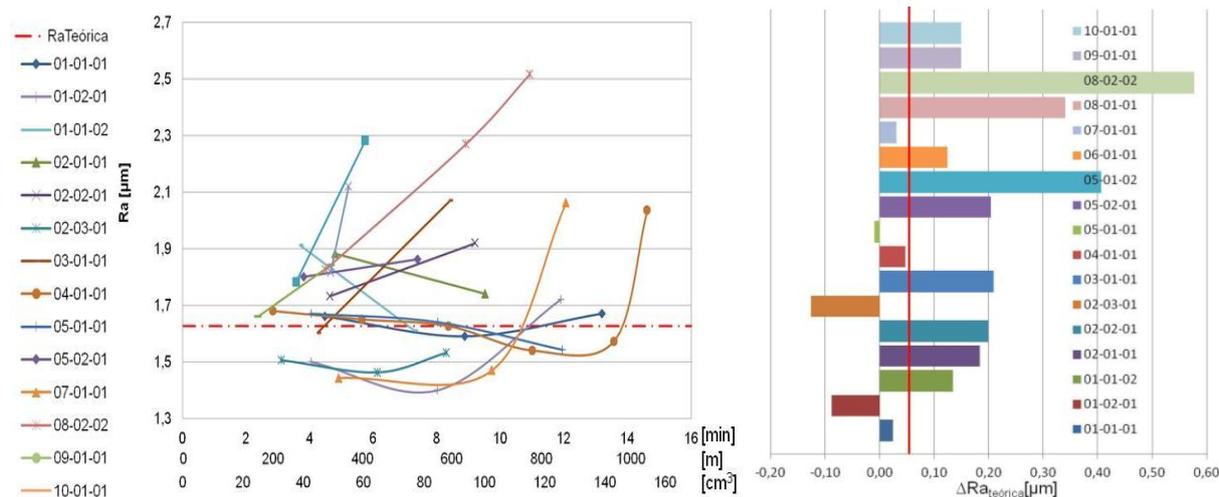


Figura 3. Izq) Evolución de Ra frente al tiempo de mecanizado, longitud de contacto y volumen de material arrancado. Dch) Variación de la Ra_{media} frente a la $Ra_{\text{teórica}}$

Si se evalúan los insertos que han obtenido un resultado positivo en la caracterización del desgaste, referencias: 01-01-01, 01-02-01, 04-01-01, 05-01-01, 07-01-01, se observa que son esas mismas referencias las que obtienen una valoración positiva en cuanto a los

requisitos de rugosidad superficial. La referencia 02-03-01 a pesar de mostrar un buen resultado en rugosidad no supera la restricción exigida ante el desgaste.

En la figura 4, se expone la geometría inicial del filo de corte, línea negra a trazos, la evolución del desgaste en la cara de incidencia y de desprendimiento. En la imagen de la cara de desprendimiento, se observa la interacción entre el cráter que se ha generado y el filo de corte, que ya no se encuentra en el radio de punta de la plaquita, línea negra a trazos, sino que se ha retrasado y se ha transformado en un filo recto, línea a trazos roja. Es en este momento cuando se produce inestabilidad en el proceso de corte, como se refleja en las imágenes de la derecha, el patrón de rugosidad deja de ser el de torneado y se produce una superficie vibrada que perjudica el acabado de la superficie mecanizada. Este efecto tiene su repercusión sobre las tres componentes de la fuerza de corte, se produce un incremento del esfuerzo de corte, al mismo tiempo que hay un aumento en la amplitud de la señal.

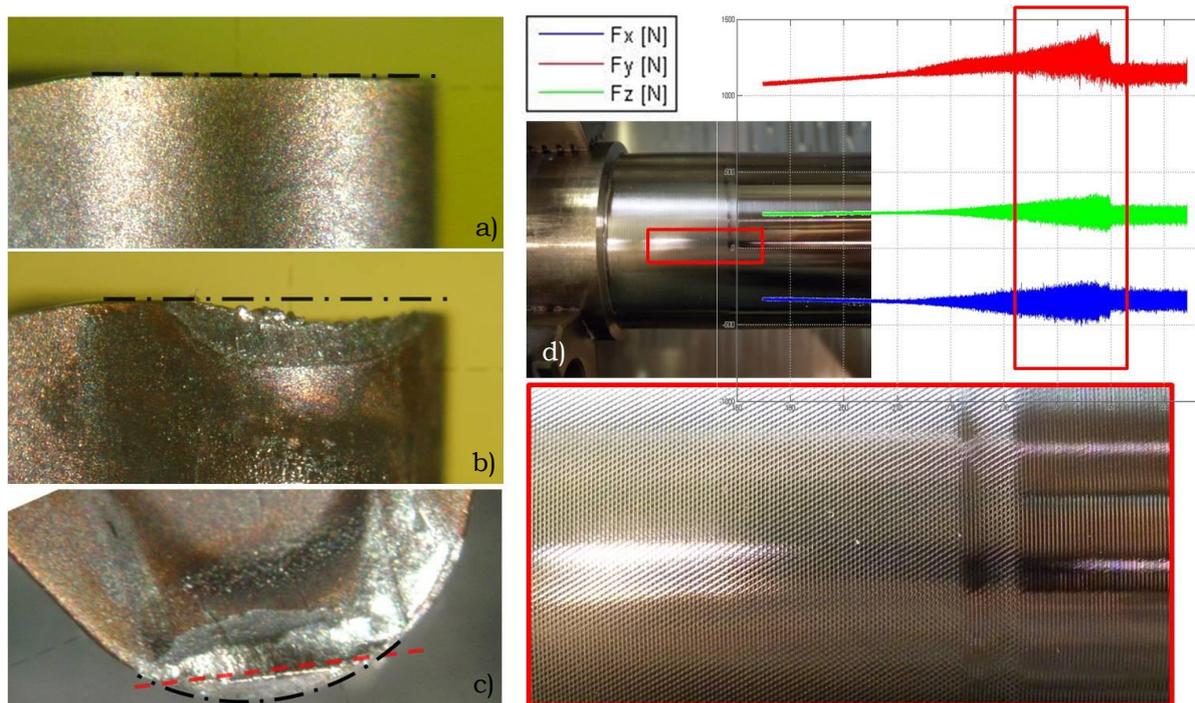


Figura 4. a) Estado inicial del filo de corte, b) VB, desgaste en cara de incidencia, c) Desgaste por cráter en cara de desprendimiento e interacción con el desgaste en incidencia, d) Acabado superficial e influencia sobre la fuerza de corte

3.3 Características geométricas del filo de corte

Definidas las referencias de los insertos que superan las condiciones de rendimiento y de rugosidad se estudiaron las características geométricas del filo de corte a través de mediciones realizadas con microscopia confocal. En la tabla 4, se presentan las características geométricas más relevantes del filo de corte y de la cara de desprendimiento. Como característica común en los insertos seleccionados se observa que el radio del filo del corte se encuentra comprendido entre 40 y 60 μ m.

En lo que respecta a la cara de desprendimiento, si se analiza la geometría de la referencia 04-01-01, plaquita que mayor rendimiento ante el desgaste presentó, se aprecia la existencia de un refuerzo del filo de 0.18mm. Esta zona, según lo observado experimentalmente, sirve de contención al cráter que se genera en esta cara, dilatando en el tiempo de mecanizado la interacción entre el retraso del filo y el cráter.

Por lo que respecta a la inclinación de la cara de desprendimiento, la primera y tercera referencias apuntadas en la tabla 4, están dotadas de un ángulo positivo de 15° aproximadamente, mientras que las tres restantes poseen aproximadamente un ángulo

positivo de 10° . Al ángulo de la cara de desprendimiento es necesario adicionarle los 6° negativos del posicionamiento en el sistema de sujeción, por lo que en posición de corte, la referencia primera y tercera de la tabla 4, se puede considerar que proporcionan un corte positivo de material, mientras que las dos últimas se comporta de manera más neutra ante el corte.

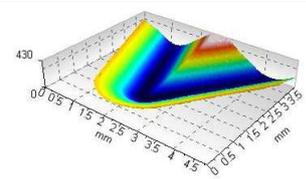
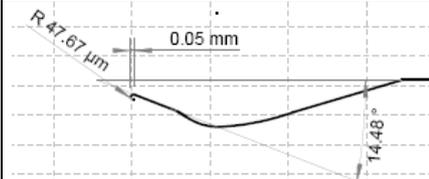
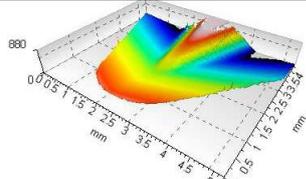
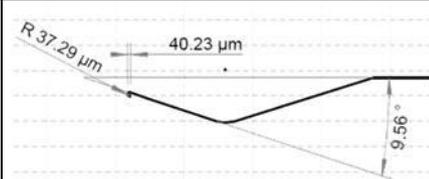
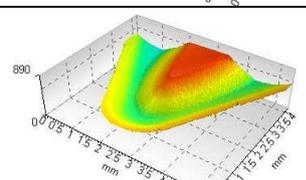
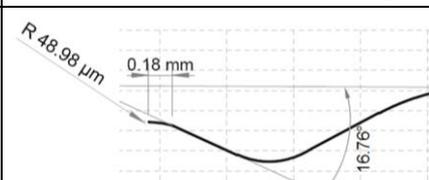
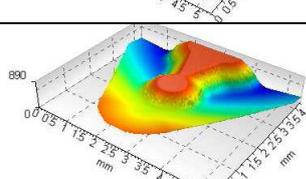
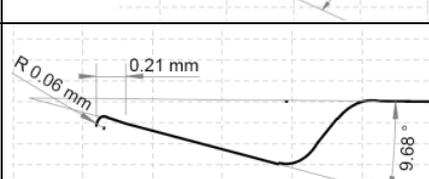
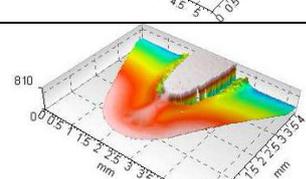
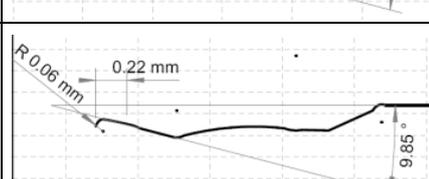
Referencia plaquita	Imagen	Topografía 3D	Características del filo de corte
01-01-01			
01-02-01			
04-01-01			
05-01-01			
07-01-01			

Tabla 4. Características geométricas de los insertos que superan los requerimientos de desgaste y rugosidad

4. CONCLUSIONES

En el sector de fabricantes de herramientas de corte existe una gran variedad de marcas comerciales que ofertan entre sus plaquitas de torneado referencias específicas para el mecanizado de aleaciones de base níquel. Esa diversidad de insertos llega incluso a las referencias de una misma marca comercial, en la que para una misma operación, recomiendan en sus catálogos el empleo de diferentes combinaciones entre tipo de metal duro, geometría de corte y recubrimiento. Es en este punto donde el trabajo expuesto presenta su mayor contribución, ya que evalúa bajo mismas condiciones de ensayo, los insertos de torneado, propuestos por los técnicos de las primeras marcas comerciales a nivel mundial, para el mecanizado de Inconel 718.

Se observó un comportamiento ante el desgaste similar en los diferentes insertos de torneado. En la cara de incidencia se produce un desgaste por abrasión, de manera uniforme a lo largo del filo comprometido en el corte, produciendo un retraso en la posición del filo de corte. En ningún caso se aprecia desgaste en forma de entalla. Como consecuencia del proceso de corte y a medida que el desgaste del filo evoluciona la

tendencia a aparecer material adherido aumenta. En lo referente a la cara de desprendimiento, se observa desgaste por cráter en las proximidades del filo. La interacción del desgaste de incidencia y de cráter acaban generando inestabilidad en el proceso de corte, que se traduce en perjuicios sobre la rugosidad superficial de la probeta, incremento de la fuerza de corte, así como un aumento progresivo en la amplitud de la señal. Se constató que este fenómeno aparece cuando el desgaste en incidencia se encuentra próximo a $VB=0.25\text{mm}$.

Tras evaluar el desgaste frente al tiempo de mecanizado, longitud de contacto y volumen de material arrancado, resulta destacable el comportamiento del inserto denominado como 04-01-01. Tras observar las características geométricas de filo, se advierte un refuerzo del filo de corte de 0.18mm . Este refuerzo favorece la contención del desgaste de cráter, de manera que la interacción con el desgaste de incidencia se produce más tarde que en el resto de los casos.

La geometría de corte del inserto es el parámetro de mayor influencia sobre el desgaste. Esta conclusión se pone de manifiesto tras la observación de dos sucesos. En primer lugar, las referencias 01-01-01 y 01-02-01, son del mismo proveedor, tienen el mismo binomio metal duro y recubrimiento, su única diferencia es la geometría del filo de corte. La diferencia de rendimientos entre las dos plaquitas es de un 10% aproximadamente. En segundo lugar, se estudia el comportamiento ante el desgaste de las tres geometrías de corte con características muy similares, aquellas en las que la cara de desprendimiento tiene un ángulo próximo a los 10° positivos. En los tres casos la marca comercial, el metal duro y el recubrimiento son distintos, pero si se observa el comportamiento ante el desgaste, las tres tienen un rendimiento del 82%.

De todas formas, el recubrimiento mediante técnica de PVD y de composición $\text{AlTiN-Al}_2\text{O}_3$ junto con un metal duro micrograno, es el que mejor comportamiento ante el desgaste ha presentado. Estas características son las del inserto de la referencia 04-01-01.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo desean agradecer al Ministerio de Ciencia e Innovación de España por la financiación de este trabajo a través del proyecto INNPACTO Desafío. No se puede obviar la colaboración de las marcas comerciales participantes en este estudio: Mitsubishi®, Sandvik®, Walter®, Sumitomo®, Iscar®, Stellram®, Kennametal®, Greenleaf®, Korloy® y Safety®.

6. REFERENCIAS

- [1] Dudzinski D, Devillez A, Moufki A, Larrouquère D, Zerrouki V, Vigneau J. *A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy*. Int. J. Mach. Tools Manufact, 44 (2004), 439–56.
- [2] Thakur DG, Ramamoorthy B, Vijayaraghavan L. *Study on the machinability characteristics of superalloy Inconel 718 during high speed turning*. Materials and Design. 30 (2009), 1718-1725.
- [3] Rolls Royce, plc (1986). *The Jet Engine*. 5th ed. England: The Technical Publications Department. 278
- [4] Guo Y, Saoubi RM, Larsson T, et al. *Surface integrity analysis of machined Inconel 718 over multiple length scales*. CIRP Annals - Manufacturing Technology. (2012), 4-7.
- [5] Bhatt A, Attia H, Vargas R, Thomson V. *Wear mechanisms of WC coated and uncoated tools in finish turning of Inconel 718*. Tribology International. 43 (2010), 1113-1121.
- [6] Kose E, Kurt A, Seker U. *The effects of the feed rate on the cutting tool stresses in machining of Inconel 718*. Materials and Design. 6 (2007), 165-173.
- [7] Settineri L, Giulia M, Lerga B. *Properties and performances of innovative coated tools for turning inconel* Int. J. Mach. Tools Manufact. 48 (2008), 815-823.
- [8] Devillez A, Coz GL, Dominiak S, Dudzinski D. *Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity*. Journal of Materials Processing Tech. 10 (2011), 590-1598.