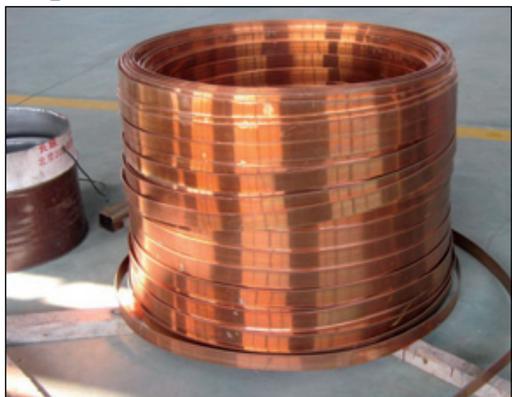


Reducción de lubricantes en el mecanizado de aleaciones no férreas: Aplicación al cobre de alta pureza



Estibaliz Díaz-Tena
Adrián Rodríguez-Ezquerro
Luis Norberto López-de-Lacalle-Marcaide
Franck Girot-Mata

Ingeniera Industrial
Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial

Universidad del País Vasco (UPV/EHU). ETSII, Dpto. de Ingeniería Mecánica.
Alda Urquijo, s/n - 48013 Bilbao. estibaliz_diaz@ehu.es. Tfno: +34 946 017347

Recibido: 07/05/2012 • Aceptado: 09/07/2012

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5046>

COOLANT REDUCTION ON THE MACHINING OF NON-FERROUS ALLOYS: APPLICATION TO HIGH PURITY COPPER

ABSTRACT

• Cost reduction and product quality are the main objectives of companies in order to be capable of expanding to new markets. Nowadays, environmental laws are more severe due to the increasing pollution problems. In this way, companies should deal with their main objectives of cost reduction and also with the idea of a green image, sustainability and innovation, focusing their processes towards the so-called "Green Manufacturing". In this paper, oxygen-free copper machining process is studied and fully analysed, trying to achieve the concept of dry or near-to-dry machining. The correct lubrication system, the correct tool material and the process parameters optimization are the keys to achieve the optimum process.

• **Keywords:** Oxygen-free copper, Green Machining, Dry machining.

RESUMEN

Las empresas tienen como uno de los objetivos principales la reducción de costes y garantizar la calidad del producto para poder hacer frente a los requerimientos del cliente y poder abarcar nuevos mercados. Sin embargo, hoy en día, dada la contaminación ambiental, es indudable el endurecimiento que las leyes de protección ambiental están sufriendo y es por eso que las empresas, además de cumplir con los objetivos antes nombrados, deben perseguir la idea de tener una imagen verde e innovadora, orientando sus procesos hacia el denominado 'Mecanizado Ecológico'.

En este artículo se pretende conseguir un proceso de mecanizado del cobre libre de oxígeno con toda omisión de lubricantes partiendo de la idea de que los puntos críticos para garantizar la calidad de un componente mecanizado se reducen principalmente a tres: la elección del tipo de lubricación adecuado, la elección de la herramienta y la optimización del proceso.

Palabras clave: Cobre libre de oxígeno, Mecanizado Ecológico, Mecanizado en seco.

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de las empresas emplean fluidos de corte sin justificación alguna, sólo 'porque va bien en otro casos'; sin embargo, en un futuro próximo se verán obligadas a replantearse su método de fabricación. Los requerimientos de los procesos de mecanizado modernos involucran reducir los costes de producción y el desarrollo de productos finales con alta calidad. Para que las empresas de hoy en día puedan hacer frente a nuevos competidores no sólo deben identificar oportunidades para la reducción de costes de producción, sino tener en cuenta también otro problema a la orden del día: la contaminación ambiental.

El endurecimiento constante de las legislaciones medioambientales y la aparición de nuevas ecotasas

son uno de los factores que han impulsado la fabricación de mínima repercusión ambiental (EBM, *Environmentally Benign Manufacturing* o *Green Manufacturing*). Este hecho hace que hayan surgido nuevos métodos de lubricación más ecológicos, como por ejemplo el mecanizado mediante MQL (*Minimum Quantity of Lubricant*) o el mecanizado en seco.

El mecanizado en seco no sólo es un beneficio ambiental, sino que reduce los costes de producción: en el caso de los fluidos de corte, el coste de adquisición, sistema de filtrado y eliminación tras su uso puede llegar a suponer más del 10% del coste de producción [1], coste que con el mecanizado en seco queda completamente eliminado.

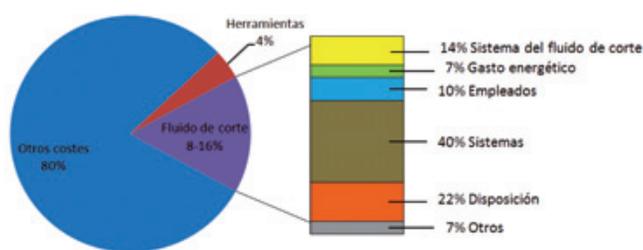


Fig. 1: Costes del ciclo de vida del fluido de corte en el mecanizado de metales

Sin embargo, cabe mencionar que el mecanizado mediante fluidos de corte tiene unos beneficios que el mecanizado en seco debe compensar. Una aproximación al mecanizado en seco sería teniendo un contacto indirecto con el fluido para de ese modo eliminar el calor generado. La investigación en el área del mecanizado en seco partiendo de esa idea ha llevado a los siguientes avances: sistemas de refrigeración ‘under-cooling’ [2], refrigeración interna con sistema de vaporización [3], sistemas criogénicos [4, 5] y sistemas de refrigeración termoeléctrico [6].

Debido a su demanda, el mecanizado en seco está siendo investigado desde diferentes puntos de vista [7-11]: nuevos recubrimientos, fuerzas de corte y rugosidad superficial entre otros, ya que la tecnología debe mejorar aún más si se desea una implementación total en la industria.

Las aleaciones férreas son ampliamente usadas en inge-

nería, pues tienen una gran cantidad de propiedades mecánicas: pueden ser fabricadas relativamente fácil y son económicas de producir masivamente. Sin embargo tienen algunas limitaciones tales como: relativamente alta densidad, comparativamente baja conductividad eléctrica e inherente susceptibilidad a la corrosión en algunos ambientes comunes. Por ello, para algunas aplicaciones es ventajoso y a veces necesario utilizar otras aleaciones que posean mayor combinación de propiedades como son las aleaciones no férreas. Entre ellas, las aleaciones más empleadas son las de aluminio, seguidas de las del cobre. Si bien hoy en día son varios los estudios que presentan la posibilidad de mecanizar en seco aleaciones de aluminio [12,13], no ocurre lo mismo con el cobre, que aún hoy está poco estudiado en cuanto a su mecanizado.

El cobre, es un material económicamente accesible y sus propiedades hacen que su uso se extienda a otras aplicaciones, siendo actualmente el tercer metal (puro o en sus aleaciones) más empleado. Una clave para entender la vigencia del cobre es la aplicación de sus propiedades (entre la que destaca su capacidad de ser reciclado) a nuevos usos que reflejan el avance de la civilización en áreas como: superconductividad, fabricación de microprocesadores, motores eléctricos, electrodos de penetración, equipamiento médico y aceleradores de partículas. Esta última es de gran interés, dado el nicho de mercado que se abre para empresas que pueden mecanizar componentes de gran precisión y calidad en cobre de alta pureza. No es descabellado pensar que muchos de los componentes de los sucesores del LHC (*Large Hadron Collider*) del CERN se puedan fabricar en empresas cercanas. En la Fig. 2. se puede apreciar cómo la prospectiva a futuro del uso de cobre y sus aleaciones para componentes relacionados con temas de I+D, instalaciones científicas y diseño técnico muestra una tendencia de crecimiento exponencial, de tal forma que en un futuro cercano será de gran valor el *Know-How* de aquellos centros y empresas que sean capaces de dominar el proceso de mecanizado obteniendo piezas y componentes sin daño térmico ni estructural, así como procesos de elevada precisión.

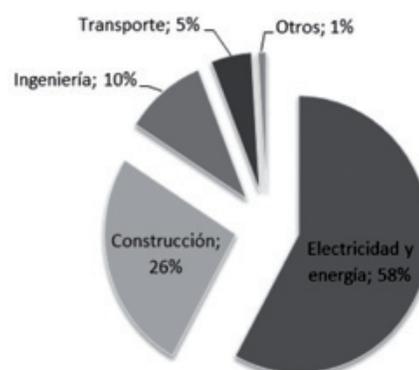
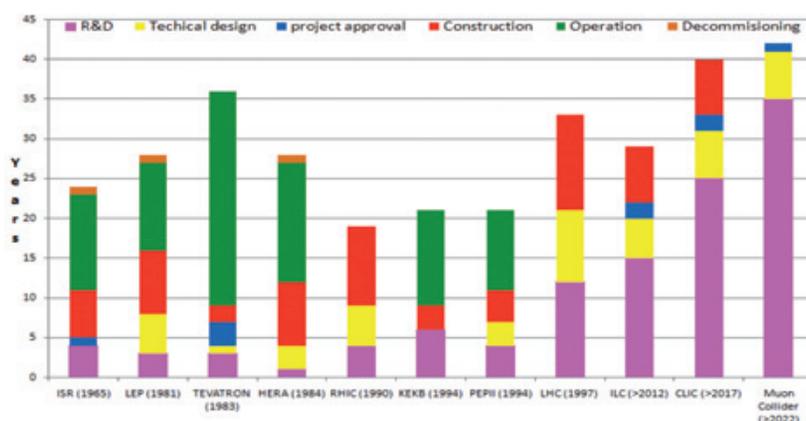


Fig. 2. Izq.) Grandes instalaciones científicas actuales y en diseño conceptual (fuente CERN). Dcha.) Porcentaje de usos del cobre en Europa

En esta investigación se propone la obtención de la información tecnológica necesaria para encontrar los parámetros óptimos de mecanizado que mejores resultados aporten en el mecanizado del cobre libre de oxígeno y en el electrolítico, según los siguientes criterios:

- Omisión de lubricantes
- Reducción de tiempos muertos
- Reducción del desgaste de la herramienta
- Reducción de afectación a la superficie mecanizada
- Optimización del proceso

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Los ensayos que se van a analizar en este artículo fueron llevados a cabo en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del País Vasco (UPV-EHU) y realizándose sobre cobre libre de oxígeno (*Cu-OFE*). Se trata de un material producido a partir de cobre electrolítico y fundido en hornos de atmósfera inerte o con desoxidantes en cantidades muy controladas. Se caracteriza por tener elevada pureza, alta conductividad eléctrica, alta deformabilidad e insensibilidad a las atmósferas reductoras. La composición dada por el fabricante es la que aparece en la Tabla 1.

Cobre	Oxígeno	Fósforo	Plata	Bismuto	Plomo
99,99%	0,0005% máx.	0,0003% máx.	0,025% máx	0,0002% máx	0,0005%

Tabla 1: Composición del cobre libre de oxígeno a ensayar

Este material se especifica típicamente según la base de datos de ASTM/UNS (*American Section of the International Association for Testing Materials*) como C10100, presentando un grado de conductividad del 101% IACS (*International Annealed Cooper Standard*), siendo el 100% IACS la conductividad correspondiente al cobre.

La metodología, que se aplicó se puede dividir en tres etapas tal y como puede verse en la Fig. 3, ya que a la hora de mecanizar un material para poder garantizar la calidad del componente se deben tener en cuenta varios puntos críticos, como son: el tipo de lubricación a emplear, la herramienta y la optimización del proceso.

En cuanto al tipo de lubricación, se establecieron cuatro posibles maneras de mecanizar el cobre: mediante el uso de taladrina comercial, con la técnica de MQL (*Minimum Quantity of Lubricant*), con *Cold Gun* (*Air Coolant System*) o en seco. Para el tipo de lubricación a emplear, como criterios de selección se establecieron medidas de rugosidad, medidas de dureza y calidad superficial.

Las herramientas empleadas fueron herramientas de acero rápido y herramientas de metal duro, en las cuales se llevó un seguimiento de la evolución del desgaste para poder definir así cual de las dos presentaba mayor resistencia al desgaste.

Finalmente, en los ensayos de optimización se establecieron como parámetros variables la velocidad de

corte y el avance por diente de la herramienta, teniendo en cuenta que como límite el fabricante del centro de mecanizado aconseja no superar una velocidad de giro de 24.000 rpm y un avance de 5.000 mm/min. En estos ensayos el criterio de selección fue la rugosidad.



Fig. 3: Esquema de la metodología de la investigación

Todos los ensayos fueron llevados a cabo en un centro de mecanizado *Kondia HS 1000*, con un cabezal capaz de girar en una gama de velocidades de 1.000-24.000 rpm a 17,5Kw. Además, se debe mencionar que esta máquina dispone de los siguientes sistemas: sistema integrado de alimentación de taladrina, sistema integrado de MQL y posible conexión a *Cold Gun*, una boquilla de efecto vortex que rebaja la temperatura del aire expelido a -20°.

Para el análisis de la superficie mecanizada, el equipo de perfilometría tridimensional con el que se trabajó para la medida de rugosidad es de la marca *Taylor Hobson*. También se empleó un sistema óptico/interferométrico de *Leica DCM* para la topografía y un microscopio electrónico de barrido, este último perteneciente a la unidad de Sgiker de la UPV-EHU. La dureza superficial se obtuvo mediante un durómetro portátil de la marca *Rocky HLN-11A*. Por último, el desgaste de la herramienta se midió utilizando un microscopio óptico, pudiendo llegar hasta 15 aumentos con 0,001mm de precisión en la medida.

3. EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS

3.1. ENSAYOS DE LUBRICACIÓN

Mediante estos ensayos se pretendía determinar qué proceso era el más adecuado a la hora de mecanizar el

cobre libre de oxígeno. Para ello, se realizó un diseño de experimentos con variación de la velocidad de corte y el avance por diente, definiendo así 9 ensayos. Estos ensayos se efectuaron en igualdad de condiciones para los cuatro tipos de lubricación a analizar, siendo en total 36 ensayos. Las herramientas empleadas fueron de acero rápido en todos los casos.

Se analizaron las diferencias de dureza, rugosidad y calidad superficial según el tipo de lubricación empleado, pudiendo así determinar bajo qué condiciones cada tipo de lubricación genera unos resultados mejores. En la Fig. 4. se presentan determinados los parámetros de corte para cada ensayo.

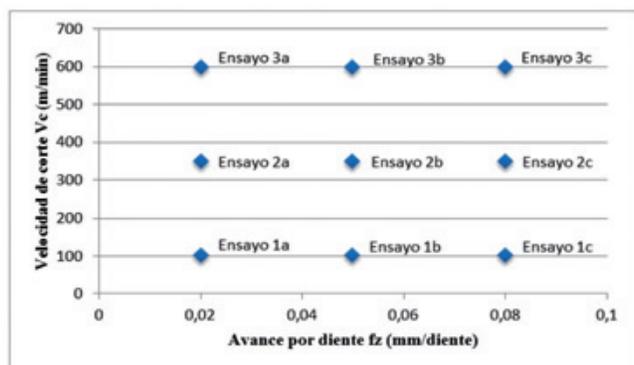


Fig. 4: Diseño de experimentos para los ensayos de lubricación

3.2. ENSAYOS DE DESGASTE DE HERRAMIENTA

Para los ensayos de desgaste, las herramientas empleadas fueron las siguientes: herramienta de acero rápido *HSSE-Co8* y herramienta de metal duro *HM-MG*, ambas de *KENDU*. En ambos casos las fresas eran frontales de dos dientes, 10mm de diámetro y 30° de ángulo de hélice.

Los ensayos se ejecutaron con taladrina en las siguientes condiciones: velocidad de corte de 350m/min y un avance por diente de 0,05 mm/diente (Ensayo 2b en la Fig. 4.). La razón de haber escogido estos parámetros reside en que la superficie no presentó defecto superficial alguno tras los ensayos del tipo de lubricación realizados anteriormente para estas condiciones.

Se empleó como estrategia fresado en zig-zag, es decir, fresado tanto en oposición como en concordancia. Tras haber realizado un determinado número de pasadas, cada herramienta se analizó en el microscopio óptico y se midió el desgaste de flanco. Este proceso fue repetido hasta que el desgaste superó el valor de 0,3 mm como valor medio.

3.3. ENSAYOS DE OPTIMIZACIÓN

Los ensayos realizados hasta esta etapa permitieron definir, por un lado, el tipo de lubricación que mejores resultados aportaba en cuanto al estado superficial en el cobre libre de oxígeno y por otro lado la herramienta que

mayor resistencia presentaba al desgaste en el fresado de dicho material. Es así como ya se tienen definidos dos puntos importantes del fresado del cobre libre de oxígeno.

Ahora bien, en vistas a optimizar el proceso de fresado, se debe trabajar en los parámetros de corte. Este era el objetivo de este apartado, en el que se partió de unas condiciones iniciales de corte y mediante variación tanto de la velocidad de corte como del avance por diente se llegó a minimizar el tiempo de mecanizado.

Las condiciones de partida se determinaron basándose en los resultados del tipo de lubricación empleada, es decir, definido el tipo de lubricación y las condiciones bajo las cuales esta lubricación conlleva mejores resultados, se aumentan los parámetros de corte.

Partiendo de esas condiciones, se realizó un diseño de experimentos de otros cuatro ensayos más y se analizó microscópicamente el estado de la superficie tras ser mecanizada, para la comparación. En la Fig. 5. se especifican los parámetros de corte empleados en estos ensayos (nótese que el ensayo A es el ensayo 3c de la Fig. 4.).

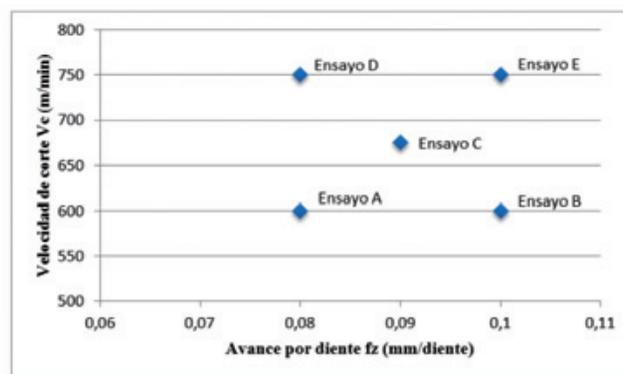


Fig. 5: Diseño de experimentos para los ensayos de optimización

4. RESULTADOS

4.1. ENSAYOS DE LUBRICACIÓN

4.1.1. Dureza superficial

En cualquiera de los cuatro tipos de lubricación analizados, la dureza varió entre 110 y 120 HB. Esta variación era insignificante teniendo en cuenta la imprecisión que presentaba el durómetro portátil. Por ello, pudo decirse que ninguno de los tipos de lubricación analizados varió la dureza del cobre. Eso sí, debe tenerse en cuenta que se habla de dureza macroscópica de la superficie mecanizada.

4.1.2. Rugosidad superficial

Para la determinación de la rugosidad superficial, se empleó como parámetro la rugosidad media o Ra. En este caso, para no tener que desplazar las piezas a la zona de medición, se usaron resinas poliméricas.

A diferencia de torneado, en fresado la rugosidad media no sólo depende del avance por diente y del radio de punta

de la herramienta, sino que intervienen otros factores como: el *run-out* de la herramienta, la flexión de la herramienta, de qué manera esté bien fabricada la herramienta y de la velocidad de corte entre otros.

Para cada ensayo y para cada tipo de lubricación empleado se realizaron tres medidas de rugosidad superficial, el valor que aparece en el gráfico es la media de ellas.

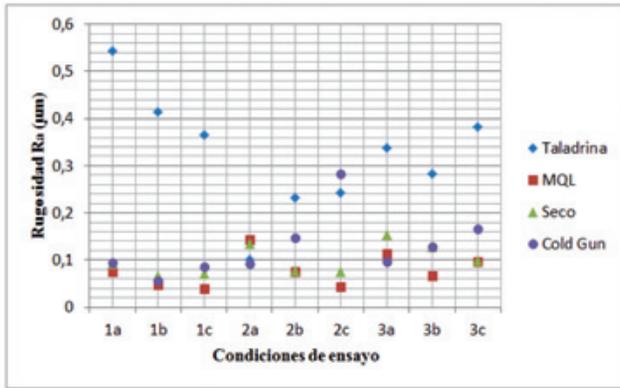


Fig. 6: Valores de la rugosidad Ra para distintos tipos de lubricación

4.1.3. Observación de la superficie mecanizada

Para el análisis superficial de las piezas mecanizadas, éstas fueron trasladadas hasta un microscopio óptico y se analizaron visualmente posibles defectos superficiales. De esta manera, se pudo definir sobre qué condiciones de corte cada tipo de lubricación dejó una mejor calidad superficial, definiendo así las posibles zonas de trabajo para cada caso (en la Fig. 7. se encuadran las zonas de ensayo con mejor calidad superficial).

Las zonas de trabajo descartadas por indicio de afectación superficial fueron aquellas que presentaron material aplastado o material adherido tras el proceso de mecanizado.

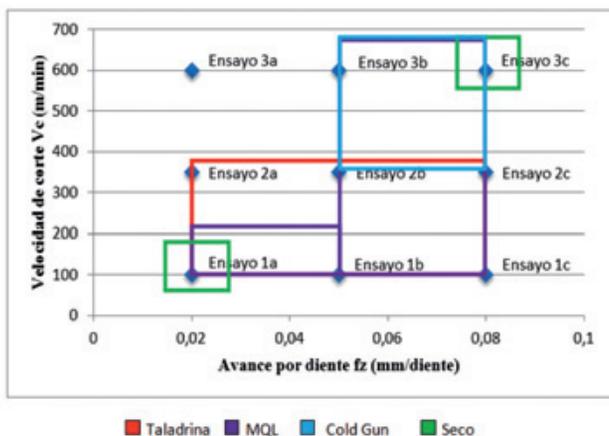


Fig. 7: Resultados de observación de la superficie mecanizada

Como se puede observar en la Fig. 7, los ensayos de taladrina presentan mejores resultados de calidad superficial

en condiciones inferiores a 385 m/min. Cabe destacar que durante el transcurso de los ensayos se pudo observar cómo la taladrina adquirió un color verdoso. Esto pudo deberse a una reacción química entre el cobre libre de oxígeno y el lubricante y debe tenerse en cuenta, pues podría afectar a las propiedades del material.

Para el caso de MQL, la zona de trabajo es mayor, obteniendo buenos resultados a velocidades en torno a 350 m/min. Para valores de velocidad próximos a 200 m/min, se puede trabajar tanto a avances por diente bajos como altos. Pero superada esa velocidad, los resultados son peores para el caso de avance por diente inferior a 0,05 mm/diente. Decir que los ensayos se realizaron con un caudal de 0,21 ml/min de MQL, sin embargo, variando la escala de la bomba se cambiaría el caudal de lubricante y se podría llegar a conseguir diferentes resultados.

Con el Cold Gun al igual que con el MQL se puede trabajar hasta 600 m/min, pero a diferencia de MQL no a velocidades inferiores de 350 m/min. En estos ensayos, se ha verificado que la colocación del Cold Gun presenta un papel importante. Por la dificultad que presentaba la colocación del Cold Gun en el cabezal del centro de mecanizado, se optó por colocarlo en la mesa, no siendo así solidario al movimiento de la herramienta y no refrigerando a todas las zonas por igual. Por ello, en una misma pieza los resultados del estado de la superficie variaron: aquellas zonas en las que el *Cold Gun* incidió directamente no apareció defecto alguno, mientras que en el resto de la pieza la aparición de material adherido y/o aplastado fue común.

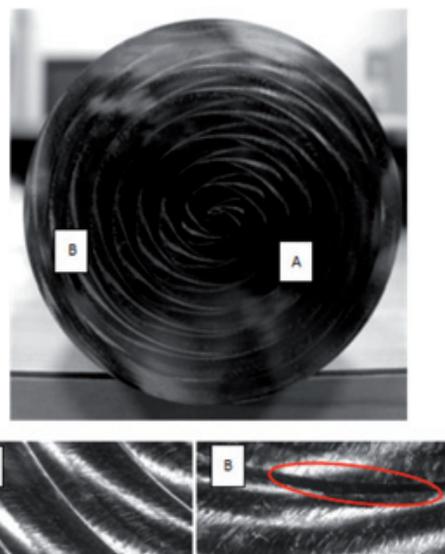


Fig. 8: Observación de un ensayo realizado en Cold Gun. a) Zona sin afectación superficial, b) zona con material adherido

Finalmente, para el mecanizado en seco, los resultados definen una zona de trabajo útil bien a bajas velocidades de corte y avance por diente o bien a altas velocidades de corte y avance por diente.

4.2. ENSAYOS DE DESGASTE DE HERRAMIENTA

Tras realizar los ensayos de desgaste con las herramientas de HSS, se pudo observar cómo a medida que aumentaba el desgaste de flanco, empeoraba el acabado superficial de la superficie mecanizada. Para ser exacto, según la herramienta se acercaba a su fin de vida el mecanizado en concordancia quedaba peor que el mecanizado en oposición y esto se detectó tanto por el sonido del mecanizado como por la rugosidad medida. Esta diferencia de superficies puede observarse en la Fig. 9.



Fig. 9: Izq.) Superficie mecanizada con herramienta de HSS nueva. Dcha.) Superficie mecanizada con herramienta de HSS con un desgaste de 0,3mm.

Además de un desgaste de flanco, en estas herramientas apareció un desgaste de cráter tal y como aparece en la Fig. 10.

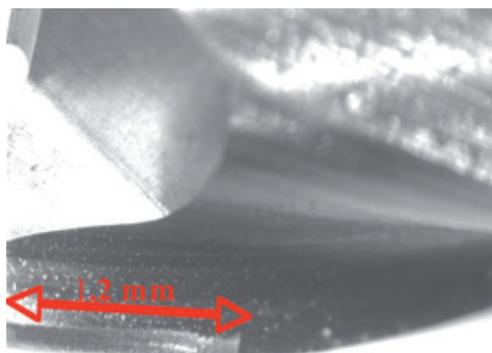


Fig. 10: Desgaste de cráter en herramientas de HSS

Como se había previsto, las herramientas de metal duro presentaron gran resistencia al desgaste. Tras realizar varias

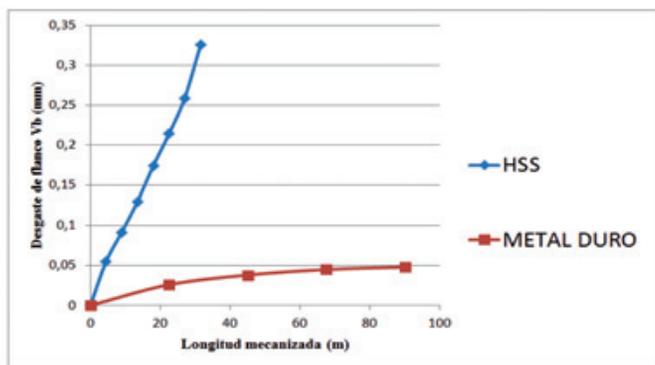


Fig. 11: Comparativa de la evolución del desgaste para ambas herramientas

pruebas en máquina se llegó a la conclusión de que llevar la herramienta de metal duro hasta alcanzar 0,3mm como valor medio del desgaste de flanco suponía un elevado gasto de material. Por este motivo, se optó por comparar la resistencia de las herramientas al desgaste en base a la longitud mecanizada.

Los valores de desgaste recogidos en las hojas de cálculo para ambas herramientas se recogen en la Fig. 11.

4.3. ENSAYOS DE OPTIMIZACIÓN

Al igual que en los ensayos realizados para la elección del tipo de lubricación, en los ensayos de optimización se llevó a cabo un análisis de la superficie mecanizada y medición de la rugosidad superficial.

Próximo a los cinco ensayos realizados en cada uno de los bloques de cobre libre de oxígeno, se pudo observar que la calidad de la superficie mecanizada fue buena en los ensayos A, B y C (ver Fig. 5.). Sin embargo, en los ensayos de velocidad de corte de 750 m/min visualmente se apreciaba restos de material adherido, lo cual en un principio dejaría los ensayos con esta velocidad de corte fuera de la optimización.

Vistas a determinar si existía desgaste en la herramienta, se analizó la misma microscópicamente. Tras la observación, no se apreció desgaste de flanco alguno, pero sí una rotura en la punta de ambos filos.

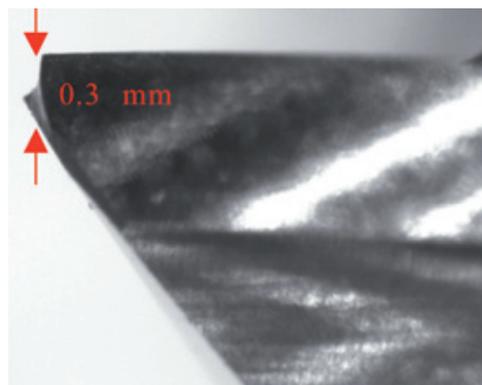


Fig. 12: Vista microscópica de punta de herramienta rota a 30 aumentos

Por esto se entró en discusión de si esta rotura influía en los resultados obtenidos, aun siendo de pequeñas dimensiones. Para evitar duda alguna, se decidió volver a realizar los ensayos de velocidad de corte 750 m/min con una herramienta nueva e igual geometría.

En efecto, los resultados mostraban ser mejores que los anteriores, no existiendo material adherido alguno y la superficie mecanizada quedaba en perfectas condiciones.

La rotura puede estar ligada a que las aristas de la herramienta son vivas y en algunos casos, como puede ser este, es mejor el uso de herramientas que presenten un pequeño redondeo para así tener mayor tenacidad a los golpes en comparación con las herramientas de aristas vivas.

En la siguiente tabla se recogen los valores de rugosidad obtenidos para los ensayos de este apartado.

Ensayo	Rugosidad R_a (μm)
A	0,756
B	0,903
C	0,941
D	1,76
E	1,93

Tabla 2: Medidas de rugosidad en los ensayos de optimización

5. CONCLUSIONES

Tras los ensayos realizados se pudo escoger el tipo de lubricación, la herramienta de corte y los parámetros óptimos del proceso. De primeras, la lubricación mediante taladrina y MQL se dejaron de lado para perseguir uno de los objetivos más importantes de este proyecto que era el de guiar el mecanizado del cobre hacia el mecanizado ecológico. Centrándose en el objetivo de optimizar el proceso, tanto el mecanizado en seco como el mecanizado mediante Cold Gun eran válidos, pues ambos presentaban buen acabado en condiciones de velocidad de corte 600 m/min y avance por diente 0.08 mm/diente (ver Fig. 7). Pero los resultados del Cold Gun dependen mucho de la posición del equipo, pudiendo llevar a no generar mejoría alguna si no es correcto el montaje, y a menudo, colocar el sistema solidario al cabezal resulta complejo.

Siendo esto así, el proceso escogido fue el mecanizado en seco por su indudable unión al concepto de *Green Manufacturing*. Además este proceso no requiere de equipamiento auxiliar, lo cual reduce los costes de adquisición y mantenimiento.

Entre herramientas HSS y metal duro, éstas últimas fueron las escogidas, pues son más resistentes al desgaste, como era de esperar: las herramientas de metal duro aun habiendo mecanizado el triple de volumen de cobre libre de oxígeno el desgaste no alcanzaba a ser ni el 17% del desgaste que se necesitaba para que la herramienta llegue a su fin de vida. Es decir, suponiendo que el desgaste fuera lineal, la herramienta de metal duro quedaría inservible tras aproximadamente 540 metros mecanizados, 18 veces más en comparación con la de acero rápido.

La elección de herramientas con mayor duración de vida útil concluye en una reducción de gastos de herramientas y una reducción de tiempos muertos. Se sabe que existe la posibilidad de realizar los ensayos con herramientas recubiertas o incluso con herramientas de PCD, las cuales sin duda alguna tendrían un comportamiento mejor ante el desgaste, si bien también debería compararse el coste que esas herramientas conllevan.

En cuanto a los ensayos de optimización, aunque con el objetivo de optimizar el tiempo de mecanizado y conseguir así un aumento de la productividad el ensayo cuyos parámetros de corte eran 750 m/min y 0,1 mm/diente de velocidad de corte y avance por diente respectivamente era

el más ventajoso (ensayo E en la Fig. 5.), resultó ser también el que mayor valor de rugosidad dejaba en la superficie (ver Tabla 2).

Por ello, en vistas a definir un límite en el valor de la rugosidad para mantener así también la calidad superficial, a la vez que se mantenía el objetivo de optimización, se decidió coger aquellos ensayos que presentaban un valor inferior a 1 μm de rugosidad como válidos.

El ensayo que reunía los dos objetivos impuestos, la optimización y la calidad superficial, era el ensayo C, con velocidad de corte 675 m/min y avance por diente 0,09 mm/diente.

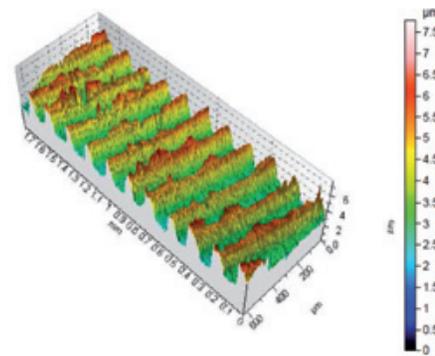


Fig. 13: Análisis topográfico de la superficie mecanizada con las condiciones de corte de ensayo C

Aunque a escala macroscópica la pieza mecanizada bajo esas condiciones de corte no presentaba material adherido ni defecto superficial alguno, analizándola mediante microscopio electrónico de barrido se observó que la calidad superficial no era tan buena como se esperaba tal y como puede verse en la Fig. 14.

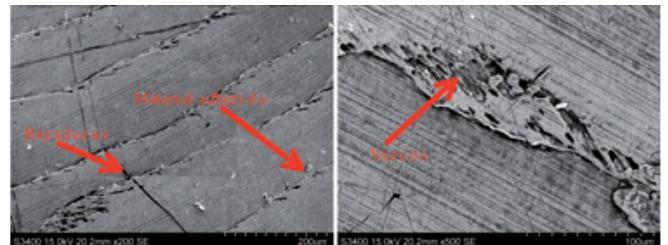


Fig. 14: Análisis mediante microscopio electrónico de barrido de una pieza de cobre libre de oxígeno mecanizada a 675 m/min de velocidad de corte y 0,09 mm/diente de avance por diente. (Izq.) 200 aumentos. (Dcha.) 500 aumentos

6. LÍNEAS FUTURAS

Este trabajo, marca algunas pautas a seguir para investigar las posibilidades de mecanizado en seco de otros materiales, dentro de las tendencias actuales hacia un mecanizado más ecológico y competitivo. El análisis que se ha realizado en este artículo ha sido en su gran mayoría a escala macroscópica: medida de rugosidad superficial,

dureza superficial y observación de la superficie mecanizada. Sin embargo, se debe tener en cuenta que aunque las ventajas del mecanizado en seco son evidentes, también hay que remarcar que la omisión total de los lubricantes hace que el calor generado durante el proceso no pueda ser evacuado. Esto repercute negativamente en el mecanizado, pues las herramientas y la pieza pueden alcanzar altas temperaturas y éstas, a su vez, pueden perjudicar las propiedades del material. En materiales como el cobre libre de oxígeno cuyas aplicaciones requieren de él unos elevados requerimientos de calidad, puede que el mecanizado en seco deje afectado el material térmicamente.

Ejemplo de ello es la Fig. 14, en la que se observa cómo el mecanizado en seco deja defectos en la superficie mecanizada: al no evacuarse correctamente la viruta, ésta raya la superficie y debido a las altas temperaturas alcanzadas, aparece material adherido y surcos.

Hoy en día se estudian nuevos procesos de mecanizado ecológicos, que a diferencia del mecanizado en seco no dejen afectación alguna.

Ejemplo de ello es el *mecanizado criogénico*. Esta técnica de lubricación consiste en sustituir los convencionales refrigerantes mediante la inyección de gases a bajas temperaturas (-200°C). Si bien en un principio se creía difícil su implantación en talleres de producción, hoy en día es indudable la importancia de este tipo de mecanizado, presentando innumerables ventajas: simplicidad y economía entre otros.

Aunque han sido varios los que han trabajado en este tipo de mecanizado sobre diferentes puntos de vista [14-17], no se ha encontrado artículo alguno que investigue el efecto del mecanizado criogénico en el cobre libre de oxígeno. Una opción alternativa es el mecanizado biológico. Existen datos de investigaciones anteriores en relación al micromecanizado y pulido de materiales mediante microorganismos. A diferencia de los estudios acerca del mecanizado criogénico, sí se tiene constancia de ensayos de mecanizado biológico realizados en cobre [18-22].

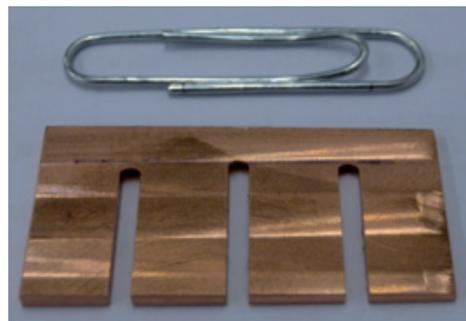


Fig. 15: Probeta de cobre libre de oxígeno para ensayos de biomecanizado (comparado con un clip en tamaño)

En el Departamento de Ingeniería Mecánica de la *Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao* (UPV-EHU) ya se está investigando en temas de biomecanizado del cobre

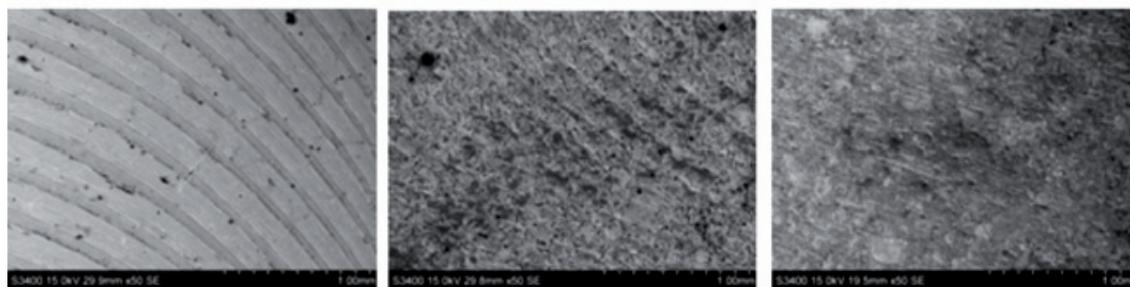


Fig. 16: Observación microscópica de superficies. Izq.) Superficie mecanizada, cntro.) Superficie biomecanizada durante 1 mes, dcha.) Superficie biomecanizada durante 2 meses.

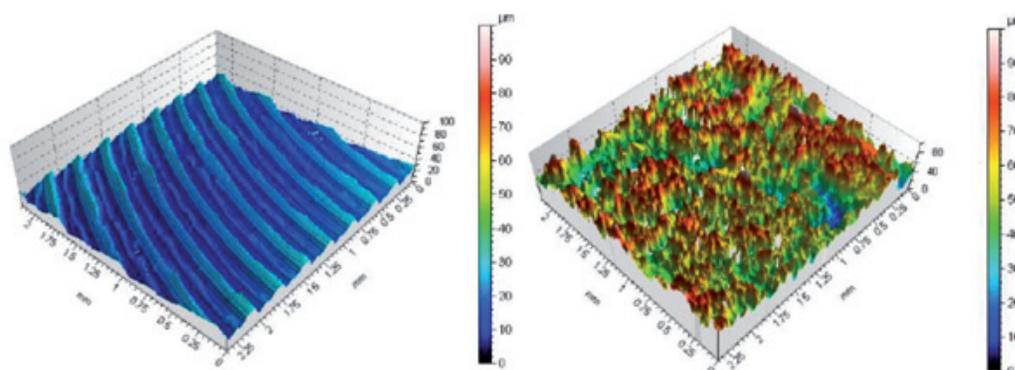


Fig. 17: Izq.) Análisis topográfico de la probeta de muestra. Drcha.) Análisis topográfico de la probeta tras permanecer 2 meses en Río Tinto.

libre de oxígeno, en colaboración con el Departamento de Ingeniería Química y del Medio Ambiente de la misma Universidad. El primer acercamiento al proceso ha consistido en introducir probetas como la de la Fig. 15. en un medio perfectamente caracterizado como es el *Río Tinto* en Huelva y retirarlas a diferentes tiempos de exposición, para así poder valorar el efecto de dicho entorno en las placas de cobre libre de oxígeno. En la Fig. 16. se puede apreciar el cambio que ha sufrido la superficie.

Del análisis topográfico realizado en el Departamento de Ingeniería Mecánica con un microscopio Leica DCM, se observa también la diferencia de las superficies. Tal y como aparece en la Fig. 17, la probeta de referencia presenta el patrón de fresado original, mientras que la probeta que ha permanecido en el medio 2 meses ha perdido completamente ese patrón y presenta una topografía aleatoria.

Aunque de momento pocos son los ensayos realizados en torno a este novedoso tema, en un futuro próximo se espera llegar a resultados interesantes.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este artículo quieren mostrar su agradecimiento a Eduardo Sasía por su apoyo y su asistencia. Se agradece al Aula de Máquina Herramienta de la ETSI de Bilbao su apoyo a este proyecto, así como al Gobierno Vasco por la beca otorgada para esta línea de investigación y a la unidad de Sgiker por el apoyo técnico mostrado en la realización del análisis mediante microscopio electrónico de barrido.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Minimum quantity lubrication for machining operations. Publicado por Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. Noviembre 2010. BGI/GUV-I 718 E
- [2] Ber A, Goldblatt M. "The influence of temperature gradient on cutting tool's life". CIRP Annals, 1989. Vol. 38-1 p. 69-73.
- [3] Jeffries N.P. "A new cooling method for metal cutting tools". Ph.D. Dissertation. Universidad de Cincinnati, Cincinnati, USA, 1969
- [4] Dudley G M. "Machine tool having internally routed cryogenic fluid for cooling interface between cutting tool and work piece". US Patent 3 971 114, 1976.
- [5] Yildiz Y, Nalbant M. "A review of cryogenic cooling in machining processes". International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2008. Vol 48 p. 947-964. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmactools.2008.01.008>
- [6]. Meyers P.G. "Tool cooling apparatus". US Patent 3 137 184, 1964
- [7] Sreejith P.S, Ngoi B.K.A. "Dry machining: Machining of the future". Journal of Materials Processing Technology 2000. Vol 101 p. 287-291 [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00445-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00445-3)
- [8] Li K.M, Liang S.Y. "Modeling of cutting forces in near dry machining under tool wear effect". International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2007. Vol. 47 p. 1292-1301. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmactools.2006.08.017>
- [9] Devillez A, Le Coz G, Dominiak S, et al. "Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity". Journal of Materials Processing Technology. 2011. Vol. 211 p.1590-1598. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.04.011>
- [10] Lahres M, Doerfel O, Neumüller R. "Applicability of different hard coatings in dry machining an austenitic steel". Surface and Coatings Technology. 1999. Vol 120-121 p. 687-691. [http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00359-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00359-X)
- [11] Weinert K, Inasaki I, Sutherland J.W, et al. "Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication". CIRP Annals- Manufacturing Technology. 2004. Vol. 53-2 p. 511-537. DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60027-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60027-4)
- [12] Nouari M, List G, Girod F, et al. "Experimental analysis and optimization of tool wear in dry machining of aluminium alloys". Wear. 2003. Vol 255 p.1359-1368. DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00105-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00105-4)
- [13] List G, Nouari M, Géhin D, et al. "Wear behavior of cemented carbide tools in dry machining of aluminium alloy". Wear. 2005. Vol 259 p. 1177-1189.
- [14] Dhananchezian M, Pradeep Kumar M. "Cryogenic turning of the Ti-6Al-4V alloy with modified cutting tool inserts". Cryogenics. 2011. Vol. 51 p.34-40.
- [15] Shane Y. Hong, Irel Markus, Woo-cheol Jeong. "New cooling approach and tool life improvement in cryogenic machining of titanium alloy Ti-6Al-4V". International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2001. Vol. 41 p. 2245-2260. [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00041-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00041-4)
- [16] Paul S, Dhar N.R, Chattopadhyay A.B. "Beneficial effects of cryogenic cooling over dry and wet machining on tool wear and surface finish in turning AISI 1060 steel". Journal of Materials Processing Technology. 2001. Vol. 116 p. 44-48. DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00839-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00839-1)
- [17] Kalyan Kumar K.V.B.S, Choudhury S.K. "Investigation of tool wear and cutting force in cryogenic machining using design of experiments". Journal of Materials Processing Technology. 2008. Vol. 203 p. 95-101 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.10.036>
- [18] Hocheng H, Chang J-h, U. Jadhav U. "Micromachining of various metals using Acidithiobacillus ferrooxidans 13820 culture supernatant experiments". Journal of Cleaner Production. 2012. Vol. 20 p. 180-185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.019>
- [19] Deyuan Z, Yaquin L. "Possibility of biological micromachining used for metal removal". Science in China. Abril 1998. Vol 41-2 p. 151-156.
- [20] Istiyanto J, Yeop Kim M, Jo Ko T. "Profi le characteristics of biomachined copper". Microelectronic Engineering. 2011. Vol. 88 p. 2614-2617 <http://dx.doi.org/10.1016/j.mee.2011.02.004>
- [21] Istiyanto J, Jo Ko T, Yoon Il-C. "A study on copper micromachining using microorganisms". International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. Octubre 2010. Vol. 11-5 p. 659-664.
- [22] Deyuan Z, Yaquin L. "Studies on kinetics and thermodynamics of biomachining pure copper". Science in China. Febrero 1999. Vol. 42-1 p. 57-62