

Mejora de las condiciones de fricción pieza-muela mediante la aplicación de mínimas cantidades de lubricante a bajas temperaturas.

E. García Gil, J.A. Sánchez Galíndez, I. Pombo Rodilla, N. Ortega Rodríguez, B. Izquierdo Aramburu, S. Plaza Pascual

*Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad del País Vasco/ Euskal Herriko Unibertsitatea.
eduardojose.garcia@ehu.es*

El uso de fluidos refrigerantes está muy extendido en rectificado. Con ellos se consigue un proceso más eficiente, en cuanto a energía consumida y volumen de muela gastado, y más preciso, las tolerancias dimensionales son más ajustadas al disminuir la distorsión térmica. Sin embargo, el coste económico y ecológico que el uso de estos fluidos conlleva hace que la tendencia actual sea hacia procesos de rectificadas en los que se reduzca al mínimo el uso de estos fluidos, e incluso se elimine.

En otros procesos de arranque de viruta como el fresado o el torneado se ha conseguido disminuir el consumo de fluidos al mínimo, y está muy extendido el uso de técnicas como “Minimum Quantity of Lubricant” (MQL) o incluso el mecanizado en seco. No es este el caso del rectificado. Al ser un proceso abrasivo las temperaturas generadas son más altas, por lo que la necesidad de refrigeración es más acusada. Además la zona de contacto es mayor lo que hace más difícil el acceso del fluido al contacto entre pieza y muela. Para dar respuesta a esta necesidad industrial se está llevando a cabo un importante esfuerzo investigador orientado a reducir drásticamente la cantidad de fluido utilizado en rectificado.

Este artículo presenta el desarrollo de una tecnología de lubricación-refrigeración para rectificado, “Minimum Coolant Grinding (MCG)”. En ella que se reduce al mínimo el consumo de fluido gracias a la aplicación de bajas temperaturas.

1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente en rectificado es necesario el uso de fluidos de corte para lubricar y refrigerar el contacto entre muela y pieza, para disminuir las temperaturas de la zona de contacto. Además el fluido de corte evacúa las virutas de la zona de rectificado limpia la muela y estabiliza el proceso [1]. A pesar de las ventajas de los fluidos de corte, éstos presentan una serie de inconvenientes por las que se busca reducir su uso o incluso eliminarlo. Los inconvenientes se deben principalmente al coste económico que su uso supone, al riesgo para la salud y su impacto medioambiental. En los últimos años la creciente preocupación por el desarrollo sostenible [2] ha hecho que la relevancia del impacto ambiental de estos fluidos sea mayor [3] y por tanto también la necesidad de eliminarlos. A estos inconvenientes hay que añadirle el hecho de que en rectificado el fluido de corte no es capaz de entrar en la zona de contacto. Según [4] el porcentaje efectivo de fluido que pasa por la zona de contacto varía entre el 5y el 20% del total utilizado.

Por todo ello se está desarrollando un importante esfuerzo investigador para reducir el uso de fluido en procesos de mecanizado. En procesos como torneado, fresado y taladrado se ha conseguido reducir el fluido de corte al mínimo o incluso eliminarlo con éxito. [5] estudiaron los efectos del mecanizado en seco. [6] utiliza la tecnología de Minimum Quantity of Lubrication (MQL) para mecanizado de engranajes, e incluso a materiales difíciles de mecanizar como Inconel 718 [7].

Pero la reducción de fluidos refrigerantes está mucho más limitada en rectificado. Ya que al ser un proceso de corte por abrasión el calor generado es mayor y por tanto las necesidades

de lubricación y refrigeración son mayores. Además la etapa de rectificado suele estar al final de la cadena de fabricación, con lo que, en el peor de los casos, el quemado puede estropear piezas con un alto valor añadido. Es por esto que el papel del fluido en rectificado es crítico y su eliminación es compleja y arriesgada.

El rectificado en seco hoy en día no da resultados suficientemente buenos por lo que la investigación está centrada en su mejora. Una alternativa al rectificado en seco es el rectificado criogénico, que usa nitrógeno líquido para refrigerar la zona de contacto. En [8] se obtuvieron mejoras en la calidad superficial de piezas rectificadas con nitrógeno líquido. El punto débil de esta tecnología es el elevado coste del nitrógeno líquido que limita su aplicación industrial. Una alternativa de bajo coste es la utilización de aire comprimido enfriado. En [9], muestran mejores resultados de rugosidad y desgaste de muela en microrectificado usando esta tecnología.

Como se ha comentado la tecnología MQL está plenamente introducida en otros procesos de mecanizado, pero no en rectificado debido a las particularidades de este proceso. Por eso, ha sufrido un fuerte impulso investigador en los últimos años. La bibliografía muestra mejores resultados con MQL que en seco tanto para aceros endurecidos [10], como para aceros dulces [11]. Otros trabajos se han centrado en la composición del lubricante. Combinando aceite o emulsión en base agua en [12] se observan mejores resultados para el aceite, lo que resalta la importancia del efecto lubricante del MQL.

La investigación también ha considerado la posibilidad de introducir modificaciones para mejorar los resultados del MQL. En [13] se usa una mezcla de agua y aceite para incrementar la capacidad refrigeradora obteniéndose temperaturas más bajas que con MQL de solo aceite. En [14] se presenta una muela autolubrificante de matriz de alúmina impregnada de micro partículas de grafito. En otro estudio se consigue mejorar las propiedades lubricantes del MQL y por tanto reducir la fricción añadiendo nano-partículas de MoS₂ al aceite del MQL [15].

La alternativa que se estudia en este artículo es la tecnología híbrida (MCG, Minimum Coolant Grinding) que combina MQL y gas a muy bajas temperaturas. Fue presentada para rectificado plano en [16] el sistema combina la aplicación de lubricante en micro-gotas y CO₂ a muy bajas temperaturas que congela el aceite en la superficie de la muela. Se consigue así una capa protectora sobre los granos de abrasivo que consigue llegar a la zona de contacto y mejorar la lubricación [17].

Partiendo de los resultados de trabajos anteriores [16] este trabajo se centra en reducir al mínimo el consumo de aceite y CO₂ de la tecnología MCG sin penalizar las prestaciones. Para ello se han utilizado aceites de alto punto de congelación (273K), que requieren menos caudal de gas para crear la capa protectora de aceite congelado sobre la superficie de la muela.

2. EQUIPAMIENTO EXPERIMENTAL

Los ensayos se han realizado en un prototipo del sistema MCG instalado en una rectificadora cilíndrica Danobat FG-600S en el Taller Mecánico de la E.T.S.I. Bilbao (UPV/EHU). Los elementos que componen el prototipo MCG son los siguientes: sistema MQL (Steidle LUBRIMAT L60), sistema CO₂. Las boquillas de los dos sistemas están orientadas radialmente sobre la superficie de la muela. Además se ha situado una pestaña que frena la barrera de aire alrededor de la muela y facilita la llegada del aceite y el CO₂ sobre la superficie de la muela (Figura 1):

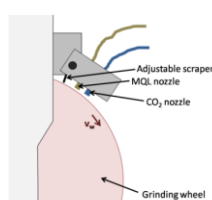


Figura 1. Esquema del Sistema MCG.

Para los ensayos se han probado dos aceites con alto punto de congelación (ET1 y FA1) suministrados por OEMETA, sus propiedades están recogidas en la Tabla 1:

	FA1	ET1
Tipo	fatty alcohol	ester oil
Punto de Congelación (K)	273	273
Flash Point (K)	463	483
Densidad 293K (g/cm ³)	0.85	0.85
Viscosidad 313K (mm ² /s)	19	9

Tabla 1. Propiedades de los aceites

La muela usada para los ensayos es la siguiente, 82AA701J6VW (DRAGAO):

- Diámetro: 450mm
- Anchura: 20mm
- Velocidad $V_s= 35\text{m/s}$

Las probetas de los ensayos tienen las siguientes características (Figura 2):

- Material: 100Cr6 acero para rodamientos (endurecido a 50-54HRC)
- Diámetro: 90mm
- Anchura: 20mm
- Anchura rectificada: 10mm (2 test por probeta)

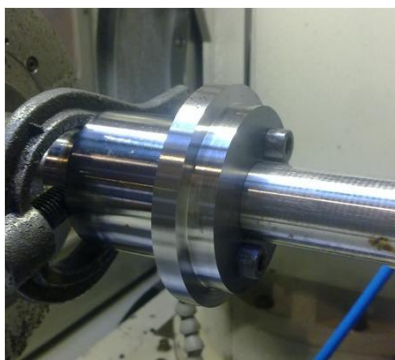


Figura 2. Probeta rectificada

3. METODOLOGÍA

El principal objetivo de este trabajo es desarrollar una comparación sistemática entre la tecnología MCG con los nuevos aceites presentados y el rectificado convencional con taladrina y reducir el consumo de CO₂ y de aceite.

Cada ensayo ha seguido la siguiente metodología. Después de un ciclo de diamantado las probetas han sido rectificadas. Sobre cada probeta se han realizado 35 pasadas de 0.5mm, para poder considerar el efecto del desgaste de muela en los resultados. Los parámetros que se han variado durante los ensayos son:

- Caudal específico de viruta $Q'_w(\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{sg})$
 - o $Q'_w= 5\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{sg}$
 - o $Q'_w= 3\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{sg}$
- Tipo de aceite
 - o FA1
 - o ET1
- Caudal de aceite
 - o $f_o= 3\text{ml}/\text{min}$

- $f_o = 8\text{ml/min}$
- $f_o = 15\text{ml/min}$
- Caudal de CO_2
 - $f_{\text{CO}_2} = 1\text{kg/min}$
 - $f_{\text{CO}_2} = 0,6\text{kg/min}$
 - $f_{\text{CO}_2} = 0,4\text{kg/min}$
 - $f_{\text{CO}_2} = 0,2\text{kg/min}$

Los Q' utilizados en estos ensayos son altos, corresponden a procesos de rectificado de desbaste ($Q'=5\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{sg}$ está cerca de los límites utilizados industrialmente). Se han elegido así para probar el funcionamiento de MCG en condiciones muy agresivas, donde las exigencias de lubricación y refrigeración son muy elevadas.

El equipo de monitorización está compuesto por un potenciómetro que permite obtener la energía específica de rectificado, e_c (J/mm^3); un sistema de medida de desgaste de muela para calcular el volumen de muela desgastado y así hallar la razón de rectificado, G-ratio;. Estas medidas se han utilizado para la comparación de los diferentes sistemas y ver su evolución con el volumen específico de pieza rectificada V'_w .

4. RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados obtenidos para MCG con diferentes caudales de aceite y de CO_2 y se comparan con los resultados obtenidos en rectificado con taladrina. Esto permite identificar el caudal y el tipo de aceite más adecuados y regular el caudal CO_2 para minimizar el consumo del sistema MCG. Al mismo tiempo, se tiene una visión de su rendimiento respecto a la tecnología convencional. Para esta comparación se ha analizado la variación de la e_c con el volumen específico de material rectificado (V'_w) y también la evolución del volumen específico de muela desgastado (V'_s) en función de V'_w .

Por una parte la evolución de la e_c en función de el V'_w da una idea de la eficiencia del proceso ya que mide la energía necesaria para rectificar la unidad de volumen de material. Por otra parte el desgaste sirve para sacar conclusiones de la capacidad del medio utilizado para proteger los granos de abrasivo.

Influencia del caudal de aceite

El primer bloque de experimentos corresponde al uso del aceite FA1, el objetivo es verificar que un caudal reducido de aceite es suficiente para la obtención de una capa tribológica que proteja a la muela y mejore la fricción. Partiendo de estudios previos [16] el caudal de CO_2 usado es 1kg/min . El caudal de aceite varía entre 3 y 15ml/min , los resultados de e_c para $Q'=3\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{sg}$ se pueden ver en la *Figura 3*.

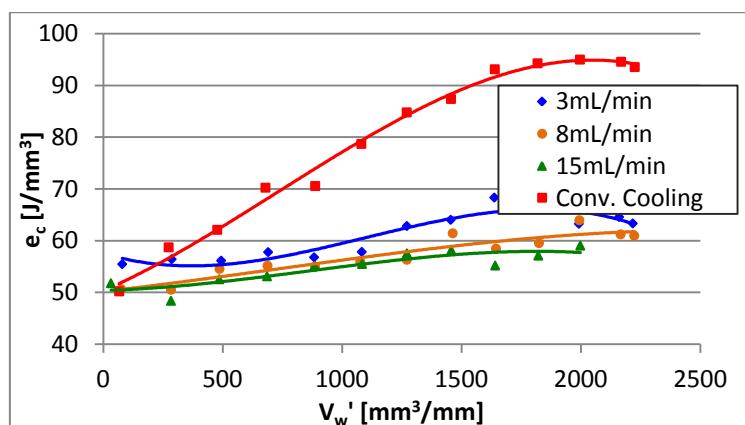


Figura 3. Influencia del caudal de MQL en la energía específica de corte. $Q' = 3\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{sg}$. FA1

En la *Figura 3* se puede observar que el consumo e_c es menor con MCG que con taladrina para cualquier caudal de aceite. Lo que significa que el sistema MCG es más eficiente. Se observa también que en el caso de la taladrina hay un rápido incremento de la e_c que se puede atribuir a una pérdida de filo de los granos. En el caso del MCG, sin embargo, el incremento es mucho menor y progresivo lo que indica que la pérdida de filo es menor; mayor protección. Centrando la atención en el MCG se ve que aumentar el caudal de aceite reduce la e_c consumida, aunque estas diferencias no son muy significativas.

El mismo ensayo ha sido realizado con $Q'=5\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{sg}$ obteniéndose resultados similares, viéndose que la diferencia entre MCG y taladrina es todavía mayor. Lo que indica que cuanto más agresivo es el proceso más eficaz es el sistema MCG comparado con taladrina.

Estos resultados se confirman con el análisis del desgaste de muela (*Figura 4*).

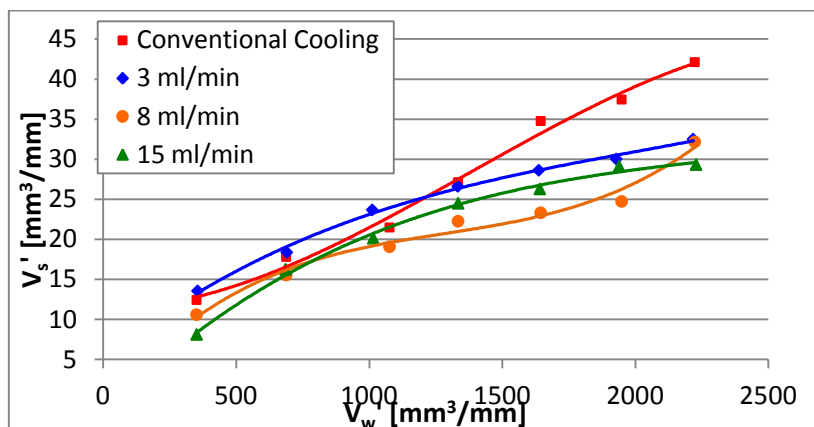


Figura 4. Influencia del caudal de MQL en el desgaste de muela. $Q'= 3 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{sg}$. FA1

En esta figura se ve que después de un inicio en el que el desgaste es similar para MCG y taladrina hay una segunda fase en la que el desgaste de muela usando taladrina es bastante mayor que usando MCG, de modo que el desgaste final experimentado por la muela es significativamente mayor cuando se rectifica con taladrina. De esta figura se han obtenido los G-ratios que confirman estos resultados. Para el caso de taladrina G es 60 que es inferior al peor de los casos de MCG (3ml/min) $G= 100$. La influencia del caudal de aceite es también apreciable ya que el desgaste de muela disminuye al aumentar el caudal de aceite: $G=120$ con 8ml/min (200% de mejora con respecto a la taladrina). Sin embargo, hay un límite porque se observa que con el caudal máximo (15ml/min) no hay una mejora de desgaste: $G=120$.

El mismo ensayo ha sido realizado con $Q'=5\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{sg}$ los resultados muestran la misma tendencia salvo que al ser el proceso más agresivo el desgaste de muela es mayor. Para el proceso con taladrina $G=30$ y para MCG con 8ml/min sube hasta $G=50$.

Influencia del tipo de aceite. Comparación entre ET1 y FA1

El siguiente paso es la comparación entre los dos tipos de aceite ET1 y FA1. Para ello los mismos tests se han llevado a cabo con tres caudales de aceite (3,8, y 15ml/min) para $Q'= 3$ y $Q'= 5 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{sg}$, con el aceite ET1.

Los resultados de energía específica de rectificado comparando los dos aceites para $Q'= 5 \text{ mm}^3$ se pueden ver en la *Figura 5*. En términos de energía no hay una diferencia apreciable entre los dos aceites. La diferencia es más importante atendiendo al desgaste de muela (*Figura 6*). Como se puede ver el desgaste cuando se aplica aceite ET1 es mucho menor consiguiéndose G-ratios de 90-100 para $Q'= 5 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{sg}$, lo que significa una mejora de 200% con respecto a FA1 y de 300% comparado con taladrina. Y lo que no hay que olvidar es que esto se consigue con una reducción de aceite de hasta el 95% con respecto a trabajos anteriores [16] en el que se usaba 60ml/min de aceite.

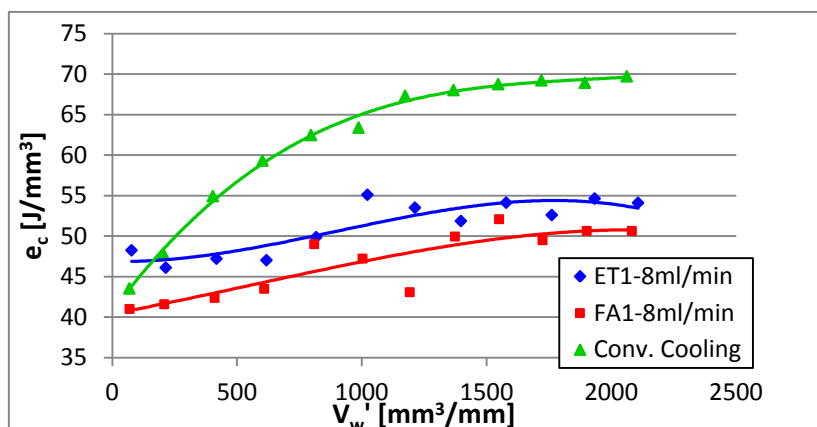


Figura 5. Comparación del rendimiento entre FA1 y ET1 en términos de e_c $Q'=5\text{mm}^3/\text{s}\cdot\text{mm}$

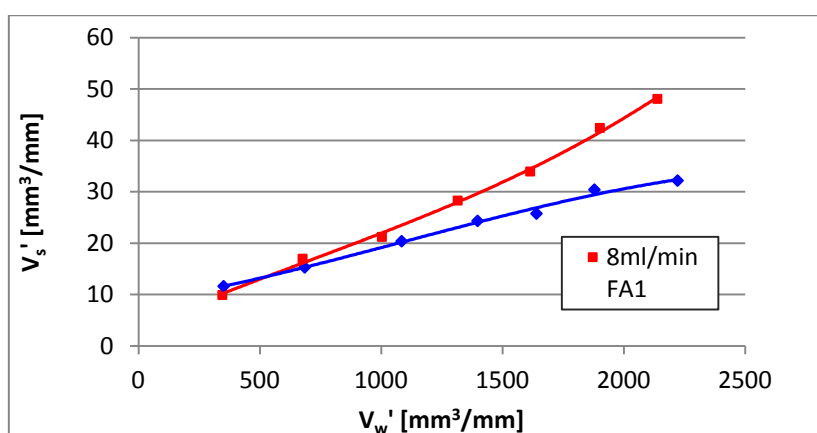


Figura 6. Comparación entre FA1 y ET1 en términos de desgaste. $Q'=5\text{mm}^3/\text{s}\cdot\text{mm}$

Influencia del caudal de CO_2

El consumo de CO_2 es un aspecto muy importante tanto desde el punto de vista ecológico como del económico. Así una vez analizada la influencia del aceite en el sistema MCG, el siguiente paso es reducir el caudal de CO_2 al mínimo sin penalizar prestaciones.

Para ello se han hecho ensayos de $Q'=3\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{sg}$ con un caudal de 8ml/min de aceite ET1 (teniendo en cuenta los resultados de la primera parte), variando el caudal de CO_2 entre 0.2kg/min y 1kg/min. Los resultados, se muestran en la Figura 7 donde se observa la variación de la energía específica de rectificado en función de V_w' para diferentes valores caudales de CO_2 .

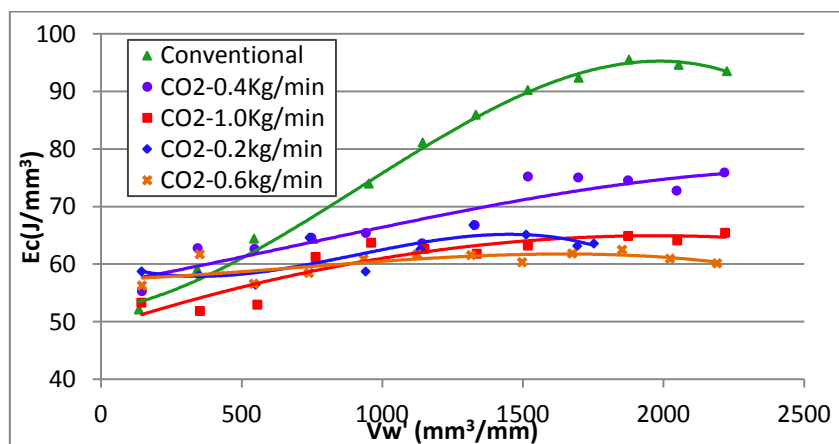


Figura 7. Influencia del caudal de CO_2 en la e_c . ET1 (8ml/min) y $Q'=3\text{mm}^3/\text{s}\cdot\text{mm}$

En esta figura se aprecia de nuevo la mayor eficiencia del sistema MCG en comparación con la taladrina, de modo que incluso para el menor caudal de CO₂ el sistema MCG es más eficiente que la taladrina. En esta figura también se puede intuir la influencia del caudal de CO₂ ya que a medida que éste aumenta el proceso es más eficiente, (la e_c es menor) aunque las diferencias no son notables.

La influencia del caudal de CO₂ comentada en el párrafo anterior se confirma al analizar el desgaste. La *Figura 8* muestra los diferentes G-ratios obtenidos en los ensayos de ajuste de CO₂ (caudal CO₂ entre 0,2kg/min y 1kg/min, $Q=3\text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{sg}$, y ET1 a 8ml/min). Se puede observar como a medida que el caudal de CO₂ aumenta el G-ratio también aumenta (el desgaste es menor), pero también se puede apreciar que esta tendencia es asintótica, es decir, pasado un caudal de CO₂ de 0,6kg/min las mejoras son muy pequeñas, con lo que no tendría mucho sentido seguir aumentando el consumo de CO₂.

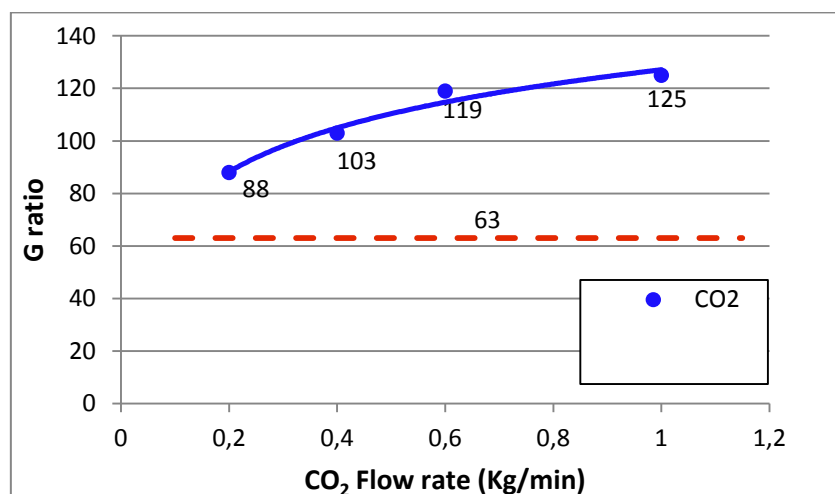


Figura 8. G-ratio en función del caudal de CO₂. ET1 (8mL/min) y $Q=3\text{mm}^3/\text{s}\cdot\text{mm}$

Con los datos presentados para esta tecnología el usuario tiene la información suficiente para decidir que parámetros quiere utilizar en su proceso.

5. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se pueden sacar de este trabajo son las siguientes:

- Se ha desarrollado un prototipo industrial para la aplicación del sistema MCG, Minimum Coolant Grinding, en rectificado cilíndrico. El sistema MCG consiste básicamente en la aplicación de MQL a bajas temperaturas.
- Con este prototipo se ha llevado a cabo un trabajo experimental orientado a reducir el consumo de aceite y CO₂. Para ello se han utilizado dos aceites., FA1, ET1 diseñados para este proceso con alto punto de congelación (273K).
- Se ha realizado una comparación sistemática entre los dos aceites y la taladrina en términos de energía específica de rectificado e_c y volumen específico de muela desgastada V'_s .
- Los resultados muestran que es posible reducir el considerablemente tanto el consumo de aceite como el de CO₂. Con respecto a estudios previos la reducción de caudal de aceite puede ser de hasta 95%, y la de caudal de CO₂ de hasta 80%.
- Cuando se compara con taladrina el sistema MCG muestra un menor consumo de energía específica y un menor desgaste de muela con la ventaja añadida de que introduce una reducción drástica en el uso de fluido.
- El aceite ET1 ha mostrado un comportamiento superior al FA1, G-ratios de 90-100 para $Q=5\text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{sg}$, lo que significa una mejora de 200% con respecto a FA1 y de 300% comparado con taladrina.

6. AGRADECIMIENTOS

Trabajo realizado gracias al apoyo del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO). Proyecto del Plan Nacional "Integración de modelos numéricos y técnicas experimentales para el aumento del valor añadido en el rectificado de componentes de precisión" (DPI2010-21652-C02-01).

7. REFERENCIAS

- [1] E. Brinksmeier, C. Heinzl, M. Wittmann. Friction, Cooling and Lubrication in Grinding. CIRP Ann.– Manuf. Technol, (1999) 48(2), 581-598.
- [2] F. Pusavec, P. Krajnik, J. Kopac. Transitioning to sustainable production – Part I: application on machining technologies. J. Clean. Prod. (2010)18(2), 174-184
- [3] F. Jovane, H. Yoshikawa, L. Alting, C. Boer, E. Westkamper, D. Williams, M. Tseng. The incoming global technological and industrial revolution towards competitive sustainable manufacturing. CIRP Annals - Manufacturing Technology, (2008) 57(2), 641-659.
- [4] M.N. Morgan, A.R. Jackson, H. Wu, V. Baines-Jones, A. Batako, W.B. Rowe. Optimization of fluid application in grinding. CIRP Ann.– Manuf. Technol, (2008) 57, 363-366.
- [5] F. Klocke, G. Eisenblatter. Dry Cutting. CIRP Ann.– Manuf. Technol. (1997) 46,519-526.
- [6] D. Fratila. Evaluation of near-dry machining effects on gear milling process efficiency. J. Clean. Prod. (2009) 17(9), 839-845.
- [7] S. Zhang, J.F. Li, Y.W. Wang. Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions. J. Clean. Prod. (2012) 32, 81-87.
- [8] N.B. Fredj, H. Sidhom, C. Braham. Ground surface improvement of the austenitic stainless steel AISI 304 using cryogenic cooling. Surf. and Coat. Tech. (2006) 200 (16-17), 4846-4860.
- [9] P.H. Lee, S.W. Lee. Experimental characterization of micro-grinding process using compressed chilly air. Int. J. Mach. Tools Manuf. (2011) 51(3), 201-209.
- [10] T. Tawakoli, M. Hadad, M. Sadeghi, A. Daneshi, S. Stöckert, A. Rasifard. An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication—MQL grinding. Int. J. Mach. Tools Manuf. (2009) 49(12-13), 924-932.
- [11] L.M. Barczak, D. L. Batako, M. N. Morgan. A study of plane surface grinding under minimum quantity lubrication (MQL) conditions Int. J. Mach. Tools Manuf, (2010) 50(11), 977-985. Elsevier.
- [12] T. Tawakoli, M. Hadad, M. Sadeghi, A. Daneshi, B. Sadeghi. Minimum quantity lubrication in grinding: effects of abrasive and coolant–lubricant types. J. Clean. Prod. (2011) 19, 2088-2099.
- [13] C. Mao, X. Tang, H. Zou, Z. Zhou, W. Yin. Experimental investigation of surface quality for minimum quantity oil-water lubrication grinding. Int. J. Adv. Manuf. Tech. (2011) 170-011-3491-3496.
- [14] M. Tsai, S. Jian. Development of a micro-graphite impregnated grinding wheel. Int. J. Mach. Tools Manuf. (2012) 56, 94–101.
- [15] P. Kalita, A.P. Malshe, A.S. Kumar, V.G. Yoganath, T. Gurumurthy. Study of specific energy and friction coefficient in minimum quantity lubrication grinding using oil-based nanolubricants. J. Manuf. Processes. (2012) 14, 160-166.
- [16] J. A. Sanchez, I. Pombo, R. Alberdi, B. Izquierdo, N. Ortega, S. Plaza, J. Martinez-Toledano. Machining evaluation of a hybrid MQL-CO2 grinding technology. Journal of Cleaner Production, (2010) 18(18), 1840-1849. Elsevier.
- [17] R. Alberdi, J.A. Sanchez, I. Pombo, N. Ortega, B. Izquierdo, S. Plaza, D. Barrenetxea. Strategies for optimal use of fluids in grinding. Int. J. Mach. Tools Manuf. , (2011) 51(6), 491-499. Elsevier.