

03-009

INFLUENCE OF DIFFERENT COOLING TECHNIQUES ON THE SURFACE ROUGHNESS IN MILLING OPERATIONS OF CARBON STEELS.

Ortells Rogero, Miguel⁽¹⁾; Abellán Nebot, Jose V⁽¹⁾; Serrano Mira, Julio⁽¹⁾; Bruscas Bellido, Gracia M.⁽¹⁾; Vila Pastor, Carlos⁽²⁾

⁽¹⁾Universitat Jaume I, ⁽²⁾Universitat Politècnica Valencia

In machining processes the use of coolants and lubricants in the cutting zone is critical to reduce cutting forces, facilitate the chip removal and improve the surface quality of the workpiece. However, the influence of different coolant/lubricant techniques on the surface finish depends on many factors, such as the geometry of the cutting tool, material of the workpiece, cutting conditions, and so on. This paper studies the effect of different lubrication techniques such as: internal coolant, external coolant, dry cutting, air coolant and MQL lubrication (Minimum Quantity Lubrication) on the surface finish and the advantages and disadvantages of these systems for milling carbon steels. The study fundamentally analyzes the variations in roughness due to the built-up edge (BUE) and the minimum chip thickness in relation to the type of lubrication / cooling used.

Keywords: *surface roughness; lubrication techniques; machining; MQL*

INFLUENCIA DE DIFERENTES TÉCNICAS DE LUBRICACIÓN EN EL ACABADO SUPERFICIAL EN OPERACIONES DE FRESADO DE ACEROS AL CARBONO

En los procesos de mecanizado la refrigeración / lubricación de la zona de corte es fundamental para conseguir menores fuerzas de corte, facilitar el arranque de viruta y mejorar la calidad superficial de la pieza. Sin embargo, la influencia de las diferentes técnicas en el acabado superficial depende de muchos factores, como la geometría de la herramienta de corte, material de la pieza de trabajo, condiciones de corte, etc. En esta comunicación se estudia el efecto de diferentes técnicas de lubricación como: lubricación interna, externa, en seco, con aire y con MQL (Minimum Quantity Lubrication) sobre el acabado superficial y se presentan las ventajas e inconvenientes de estos sistemas para el fresado de aceros al carbono. El estudio analiza fundamentalmente las variaciones de rugosidad debidas al efecto de filo recreado (Built-up Edge, BUE) y del espesor mínimo de viruta en relación con el tipo de lubricación / refrigeración empleada

Palabras clave: *acabado superficial; técnicas de lubricación; mecanizado; MQL*

Correspondencia: José V Abellán; abellan@uji.es



©2018 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

En los procesos de mecanizado, la rugosidad superficial es una de las características más importantes de la calidad del producto y tiene una gran influencia en los costes de fabricación, el aspecto estético y las características tribológicas de las piezas como resistencia a la fatiga o corrosión. La calidad superficial está directamente relacionada con las condiciones de trabajo como la velocidad de corte, la velocidad de avance y la profundidad de corte. Sin embargo, la rugosidad superficial no solo está influenciada por estos parámetros sino también por un gran número de factores como son: el desgaste de la herramienta de corte, características del material de corte y de la pieza a mecanizar, la geometría de la herramienta de corte, la estabilidad y rigidez de la máquina-herramienta, el sistema de amarre, la aparición del filo recrecido durante el corte, la existencia de refrigerante / lubricante de corte, etc. (Stephenson & Agapiou, 2016). De todos estos factores, uno de los que más interés está recibiendo en los últimos años es el relacionado con las condiciones de refrigeración / lubricación.

En la última década, las legislaciones nacionales y comunitarias han mostrado un mayor control sobre el uso de lubricantes de corte tanto por aumentar la seguridad de los trabajadores (el uso de lubricantes de corte en planta puede generar problemas respiratorios y reacciones cutáneas entre otros (Klocke & Eisenblätter, 1997) como por limitar el impacto ambiental de los mismos. Además, algunos estudios concluyen que el coste global del uso de lubricantes de corte en operaciones de mecanizado supera incluso a los costes de uso de las propias herramientas de corte, asociando el sobre coste al deterioro y la consiguiente sustitución de las mismas (Klocke & Eisenblätter, 1997). Todo esto ha fomentado el estudio de la aplicación de técnicas de lubricación menos contaminantes y nocivas como son: el mecanizado en seco, mecanizado con enfriamiento por aire y mecanizado con lubricación mínima (MQL) entre otros. Estas técnicas de refrigeración/lubricación han sido ampliamente estudiadas validando su potencial frente a técnicas tradicionales de lubricación como la lubricación por inundación. Muchas de las ventajas de estas nuevas técnicas de lubricación que suelen citarse en los trabajos publicados son una mayor vida útil de la herramienta de corte, menores temperaturas de corte, menor coste de uso de lubricante, menor impacto ambiental y, en algunos casos, mejores acabados superficiales.

Sreejith (2008) estudió el efecto de diferentes técnicas de lubricación (lubricación por inundación, MQL y mecanizado en seco) durante el mecanizado de aleaciones de aluminio 6061 con herramientas de carburo con recubrimiento de diamante. En todas las operaciones de corte realizadas se observó la aparición de filo recrecido (adherencia del material de la pieza de trabajo sobre la herramienta de corte), siendo mayor durante el mecanizado en seco, y menor con la lubricación por inundación, lo que condicionaba la calidad superficial final de la pieza. El uso de la técnica MQL mejoró el acabado superficial con respecto al seco, obteniendo además menor rugosidad superficial cuanto mayor es el caudal de lubricante empleado. Sin embargo, en la investigación de Yan, Yuan, y Liu (2012), la aplicación de diferentes técnicas de lubricación como en seco, por inundación y MQL dio lugar a valores de rugosidad superficial similares aunque, debido a la influencia del desgaste de la herramienta en la rugosidad, la calidad superficial empeoró más rápidamente en la operación en seco. Con la lubricación por inundación la vida de la herramienta aumentó y con ello se mantuvo la calidad superficial, pero es la lubricación por MQL la opción que mostró una mayor vida útil de la herramienta incluso frente a la lubricación por inundación.

Yalçın, Özgür y Koru, (2009) estudiaron el efecto de diferentes técnicas de lubricación (en seco, por aire, y por inundación). La vida de la herramienta fue mayor con la lubricación por inundación, seguido por la refrigeración por aire. La rugosidad superficial independientemente del estado de desgaste de la herramienta estuvo claramente

relacionada con la técnica de lubricación empleada, siendo mejor la lubricación por inundación, seguida por la de aire y finalmente en seco. Este estudio muestra que la influencia en el acabado superficial está muy relacionada con la formación del filo recrecido, que es inevitable en la operación en seco de materiales blandos mientras que las otras técnicas disminuyen este efecto, en especial la lubricación por inundación.

Dhar et al. (2006) estudiaron cómo influye la lubricación MQL sobre la temperatura durante el corte, la formación de viruta y la calidad superficial en operaciones de torneado con insertos de metal duro sin recubrimiento. Experimentalmente se mostró la influencia positiva del MQL tanto en la reducción de la temperatura, mejora de la calidad superficial y mejora en la formación de viruta ya que el coeficiente de reducción de viruta (definido como el cociente entre el espesor de viruta tras el cizallado y el espesor de viruta antes de su formación o bien como la inversa de la relación de viruta) disminuye frente al uso de refrigeración por inundación o en seco. Un trabajo similar fue realizado por Hadad y Sadeghi (2013) donde se investigó la influencia de los parámetros de corte en operaciones de torneado con MQL. Se comparó el resultado de las operaciones de torneado tanto en fuerzas de corte, temperatura, y rugosidad superficial con las técnicas MQL, por inundación y en seco, donde la técnica MQL se analiza con el uso de diferentes boquillas orientadas sobre el inserto de corte. Para todas las condiciones de corte estudiadas, la menor rugosidad superficial se obtiene claramente cuando se emplea la lubricación mínima (MQL). Rahman, Kumar y Salam (2002) compararon el uso de técnicas MQL con respecto a la refrigeración por inundación y en seco en operaciones de planeado, verificando que la calidad superficial con MQL y por inundación son similares y ligeramente mejor que la obtenida mediante el mecanizado en seco.

En otros trabajos previos como el realizado por Abellán-Nebot et al (2017), se observa la influencia de los parámetros de corte en la formación de la rugosidad superficial y el impacto de cambios en el proceso como cambios en la máquina-herramienta o cambios en la herramienta de corte. Sin embargo, en este trabajo, aunque se comparan los resultados de un pequeño diseño de experimentos, se obtiene que no es significativa la influencia de la técnica de lubricación, generándose valores de rugosidad superficial similares durante el mecanizado en seco y con refrigeración por inundación.

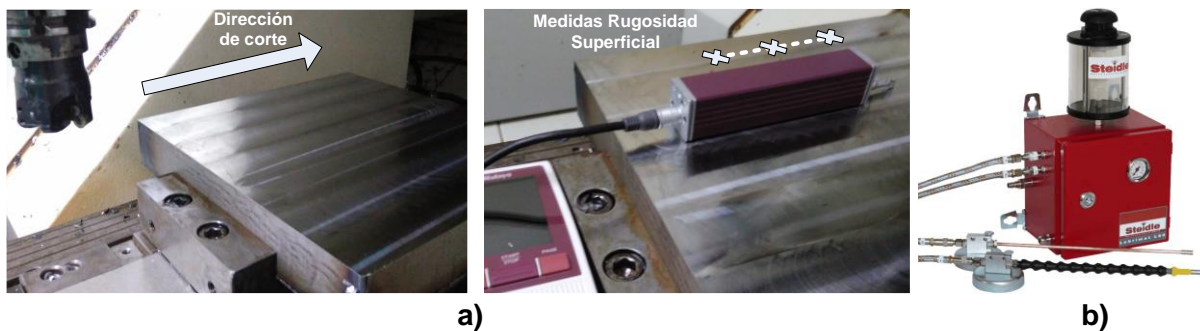
En esta comunicación se estudia el efecto de diferentes técnicas de lubricación como lubricación por inundación, en seco, con aire y con MQL sobre el acabado superficial. El estudio analiza fundamentalmente las variaciones de rugosidad debidas al efecto de filo recrecido (Built-up Edge, BUE) y del espesor mínimo de viruta en relación con el tipo de lubricación / refrigeración empleada sin tener en cuenta el efecto del desgaste del inserto. Esta comunicación se estructura de la siguiente manera. La Sección 2 define el equipamiento experimental y el diseño de experimentos que se lleva a cabo para analizar la influencia de las diferentes técnicas de lubricación en el acabado superficial. La Sección 3 muestra los resultados experimentales, mientras que en la Sección 4 se analizan los resultados obtenidos. Finalmente, la Sección 5 muestra las conclusiones más relevantes del estudio.

2. Equipamiento y diseño experimental

Para el estudio experimental se hace uso de un centro de mecanizado CNC Deckel Maho DMC70V, un plato de plaquitas de 52 mm de diámetro (referencia KDM200RD12S075C) con insertos de carburo redondos de 12 mm de diámetro (referencia RDPX12T3M0SHN KCPM20), y material a mecanizar tochos de 250 x 250 mm de acero al carbono DIN S275JR (HB 150). Para evitar la influencia del runout entre insertos sobre la rugosidad superficial se emplea durante la experimentación un único inserto de corte. Las diferentes estrategias de refrigeración disponibles son: i) en seco; ii) por inundación con taladrina (95% agua y 5% del

fluido de corte semi-sintético Rhenus TS 30); iii) por aire comprimido a la presión de red, aproximadamente 10 bares; y iv) por lubricación mínima MQL (referencia Steidler Lubrimat L-60) con aceite vegetal (referencia Lubrimax Edel-C). El sistema de lubricación MQL se configura con caudal de lubricación de 6 ml/h, de modo que se emplea el sistema dentro de su rango más bajo, ya que el equipo de MQL se suele emplear entre 5 y 80 ml/h (Walker, 2013).

Figura 1: a) Operación de planeado analizada bajo diferentes técnicas de refrigeración e inspección de la rugosidad superficial mediante rugosímetro Mitutoyo SJ-210; b) Sistema de lubricación mínima (MQL)



Para analizar la influencia de las estrategias de refrigeración sobre la rugosidad superficial, se plantean 2 estudios experimentales. El primer estudio se centra en el análisis de la rugosidad superficial según la técnica de refrigeración empleada. Para una aplicación concreta, es decir con una máquina-herramienta, utillaje, herramienta de corte y material bruto a mecanizar, las variables que influyen en la calidad superficial de la pieza son principalmente los parámetros de corte y, dentro de estos, los más relevantes son la velocidad de corte y el avance por diente tal y como se muestra en la revisión bibliográfica en (Abellán-Nebot et al., 2018). Por ello, el diseño de experimentos planteado busca analizar la variación de la rugosidad superficial sobre todo el rango de valores en cuanto a velocidad de avance y velocidad de corte se refiere, manteniendo constante la profundidad de pasada axial y radial. Asumiendo que las interacciones entre la velocidad de corte y el avance por diente son de menor importancia (así se observa en muchos casos como se indica en Abellán-Nebot et al., (2018)), se realiza una primera experimentación donde se analiza el comportamiento de la rugosidad superficial para una velocidad de corte fija de 250 m/min y diferentes valores de avance por diente $f_z = [0.04 \ 0.06 \ 0.1 \ 0.15 \ 0.2 \ 0.3 \ 0.4 \ 0.5]$ mm. Para todas ellas, se mantiene constante la profundidad de pasada axial y radial a 0.5 mm y 37.5 mm respectivamente. Esta experimentación se repite para cada técnica de lubricación empleando en cada caso un filo de corte nuevo evitando así una posible influencia del desgaste en la rugosidad superficial. La secuencia del avance por diente en la experimentación se realiza de forma aleatoria, y se mantiene esa secuencia en cada una de las técnicas de refrigeración a estudiar. Para cada combinación de condiciones de corte, se recogen algunas de las virutas generadas para su posterior análisis. La segunda experimentación se realiza de modo similar pero en este caso se mantiene fijo el avance por diente a 0.3 mm y la velocidad de corte se modifica para los siguientes valores $V_c = [100 \ 115 \ 130 \ 150 \ 175 \ 225 \ 250 \ 300]$ m/min. De igual modo que en la experimentación anterior, se recogen algunas virutas para su posterior estudio.

El segundo estudio experimental emplea las virutas almacenadas en la experimentación anterior y tiene como objetivo analizar la eficiencia del proceso de corte. Del estudio de la viruta es posible inferir el coeficiente de reducción de viruta que define el ángulo de

cizalladura durante el corte y con ello la dirección de las fuerzas de corte y la eficiencia de la energía consumida, tal y como se detalla en las principales referencias bibliográficas sobre teoría de corte (Trent & Wright, 2000). Durante el proceso de arranque de viruta el volumen de la viruta antes y después de la deformación plástica se mantiene constante, de modo que se cumple la condición:

$$l_0 \cdot b_0 \cdot t_0 = l_1 \cdot b_1 \cdot t_1 \quad (1)$$

Donde l, b y t corresponden a la longitud, el ancho y el espesor de la viruta, respectivamente, y los subíndices 0 y 1 indican antes y después de la deformación plástica. Durante la deformación plástica el ancho de la viruta suele mantenerse constante, de modo que se define el ratio de reducción de viruta como:

$$r = \frac{t_0}{t_1} = \frac{l_1}{l_0} \quad (2)$$

Este ratio permite estimar el ángulo de cizalladura durante el corte como:

$$\tan\varphi = \frac{r \cdot \cos\gamma}{1 - r \cdot \sin\gamma} \quad (3)$$

donde φ es el ángulo de cizalladura y γ el ángulo de la cara de desprendimiento de la herramienta de corte. Este ángulo de cizalladura está relacionado con el coeficiente de fricción (Grzesik, 1999):

$$\mu = \tan^{-1} \left(\frac{\pi}{4} - \varphi + \gamma \right) \quad (4)$$

Por tanto, la efectividad de la acción lubricante viene directamente relacionada con el ratio de la reducción de viruta y sirve como indicador de la eficiencia del proceso de corte. En muchas ocasiones, en lugar del ratio de reducción de viruta de la Ecuación (2) se emplea la inversa de esa expresión dando lugar al denominado coeficiente de reducción de viruta.

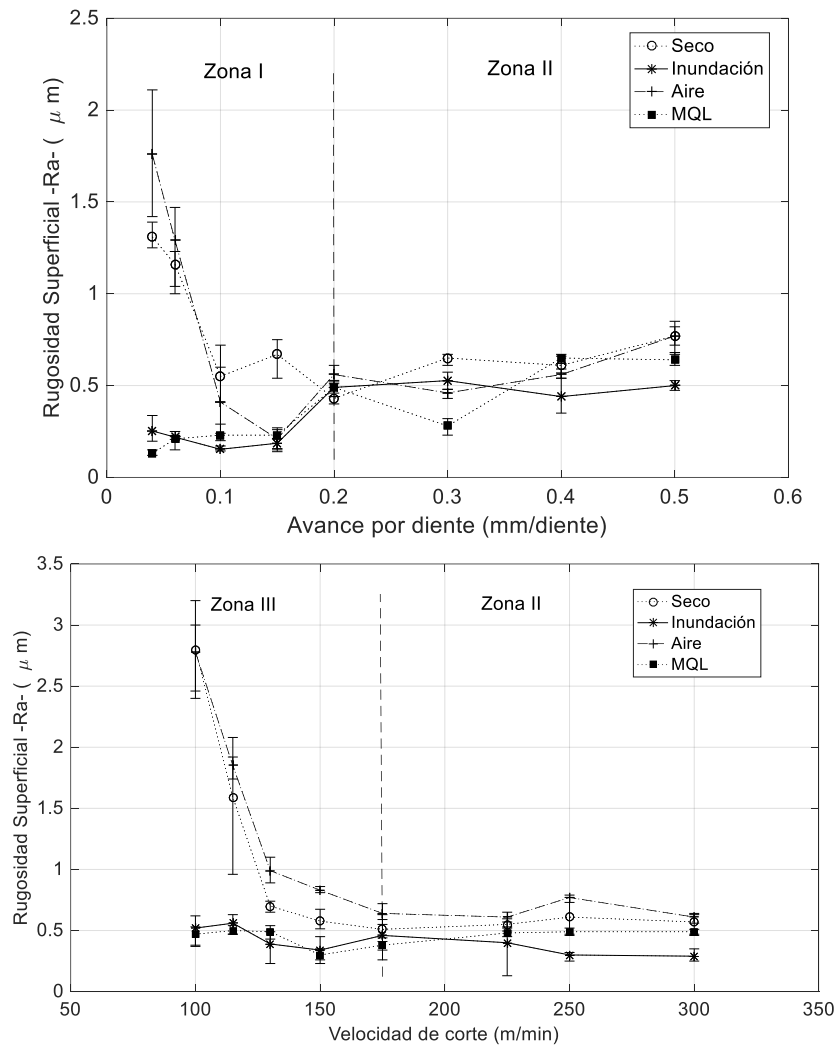
$$\zeta = \frac{t_1}{t_0} = \frac{l_0}{l_1} \quad (5)$$

De modo experimental este coeficiente se puede obtener midiendo el espesor de viruta haciendo uso de un pie de rey digital aunque existen otros procedimientos experimentales válidos para estimar el coeficiente de reducción de viruta (Popovic, Tanovic, & Ehmann, 2017). Para el presente estudio experimental, el espesor de viruta será el valor promedio obtenido tras la medición mediante el pie de rey de 3 muestras de viruta para cada combinación de parámetros.

3. Resultados experimentales

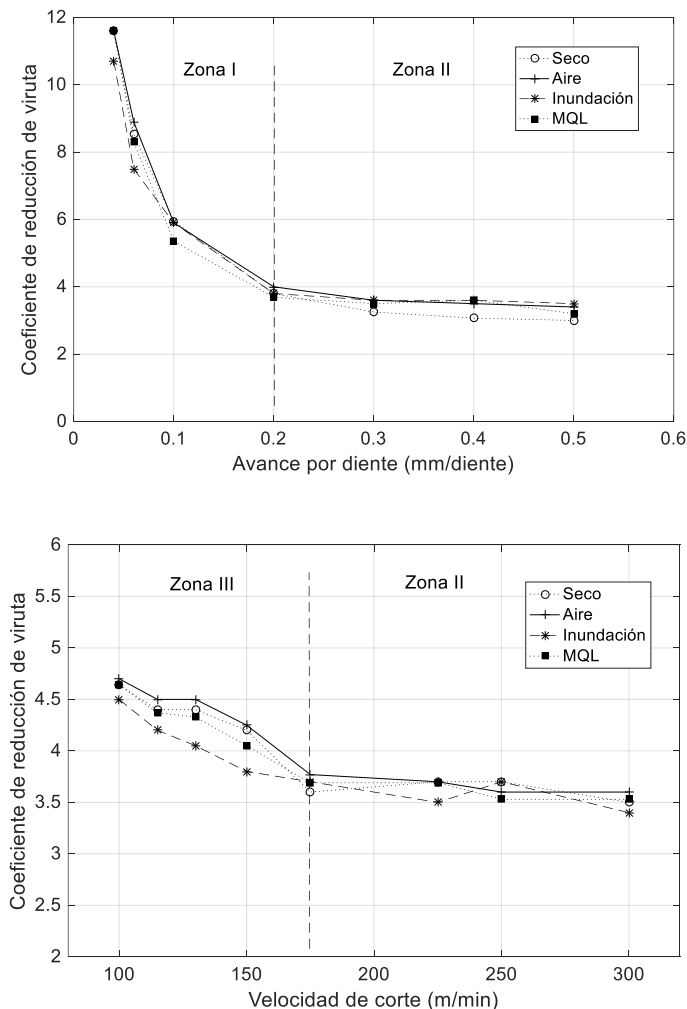
Los resultados de la experimentación se muestran en las Figuras 2 y 3. Como se observa en la Figura 2, la influencia de la técnica de refrigeración sobre el acabado superficial es clara y depende de las condiciones de corte empleadas. Así, se puede distinguir tres zonas de trabajo. La zona I, engloba la zona donde el avance por diente es tan bajo que el espesor de viruta es menor al mínimo que se necesita para que se genere el cizallado del material de forma adecuada, produciéndose un efecto de recalado que genera una mala calidad superficial. La zona II sería la zona que presenta un comportamiento más lineal y viene definido principalmente por la geometría de la herramienta de corte y las condiciones de corte V_c y f_z , siendo de menor importancia el efecto de la técnica de refrigeración. Por último, la zona III vuelve a mostrar un cambio de la tendencia esperada de la rugosidad superficial, y se debe básicamente a la aparición del filo recreado al emplearse velocidades de corte bajas. Bajo estas condiciones, el material de corte queda adherido al inserto modificando su geometría e incrementando la rugosidad superficial.

Figura 2: Influencia de las diferentes técnicas de refrigeración sobre la rugosidad superficial en las distintas zonas de estudio I, II, y III: a) Gráfica Ra vs V_c ; b) Gráfica Ra vs f_z .



Por otro lado, la Figura 3 muestra cómo varía el coeficiente de reducción de viruta según las condiciones de corte y la técnica de refrigeración empleada, observándose también un comportamiento diferente según las condiciones de corte empleadas. Sin embargo, para estas gráficas la diferencia entre las diferentes técnicas de refrigeración empleadas son difíciles de apreciar, probablemente por la metodología empleada en la medición del espesor de viruta, donde la precisión del pie de rey (instrumento con apreciación de ± 0.01 mm) y la dificultad de medir de forma consistente en la misma zona de la viruta puede limitar la capacidad de detectar diferencias entre los coeficientes de reducción de viruta. En cualquier caso, se observa la influencia clara de las condiciones de corte con el coeficiente de reducción de viruta, siendo esta influencia muy marcada en las zonas I y III diferenciadas anteriormente.

Figura 3. Coeficiente de reducción de viruta según técnica de refrigeración: a) según velocidad de corte; b) según avance por diente.



4. Discusión

Los resultados experimentales de la Figura 2 y 3 muestran la influencia de las diferentes técnicas de refrigeración sobre el acabado superficial y sobre la eficiencia en el proceso de arranque de viruta. En la Figura 2 se muestra un claro comportamiento diferente en las zonas I, II y III anteriormente descritas. Para la zona I, donde el espesor de viruta es muy pequeño, se produce el efecto de recalado. Sin embargo, la importancia de este efecto depende de la técnica de refrigeración empleada. Así, el uso de refrigeración por inundación o MQL permiten minimizar ese efecto para las condiciones de corte analizadas, consiguiendo rugosidades muy bajas, mientras que con el mecanizado en seco o refrigerado las rugosidades son mucho más elevadas. Esto puede deberse a que cuando la temperatura de corte aumenta por la falta de refrigeración/lubricación, el material se comporta más dúctil y esto puede aumentar el espesor mínimo de viruta, lo que hace que este fenómeno de recalado aparezca a una velocidad de avance por diente mayor. Un efecto similar se da en la zona III, donde aparece el filo recreado. En este caso debido a las bajas velocidades de corte, se forman capas de viruta debido al rozamiento en la superficie de contacto viruta-herramienta que se quedan adheridas a la propia herramienta, lo que produce un empeoramiento del acabado superficial. Bajo estas condiciones, una adecuada lubricación

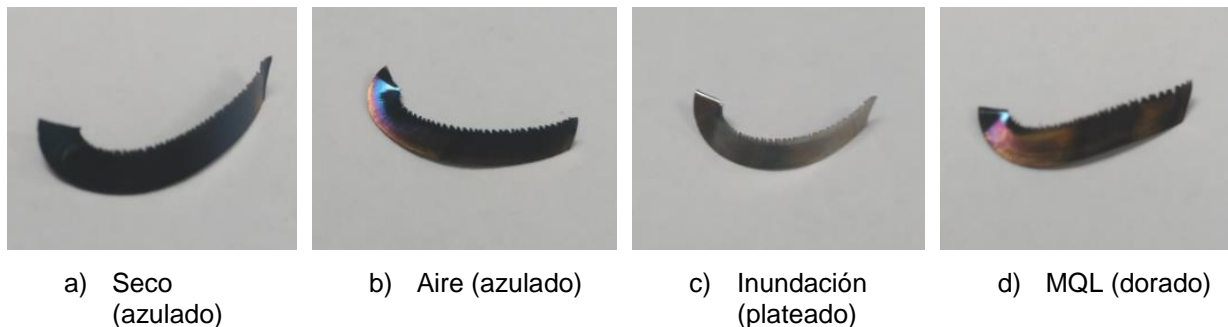
minimiza o reduce la aparición del filo recrecido ya que previene de la adhesión del material de trabajo en el filo de corte. Por último, en la zona II, donde el proceso de corte es más o menos estable y la rugosidad superficial viene definido fundamentalmente por la geometría del inserto de corte, las diferentes técnicas de lubricación parecen no influir en exceso en el resultado de la rugosidad superficial. De la Figura 2 se observa que la rugosidad superficial con la técnica de inundación es ligeramente mejor que con cualquier otra técnica. La técnica de MQL también genera valores de rugosidad ligeramente mejores que con el mecanizado en seco o con aire, pero ligeramente peor que con la refrigeración por inundación.

Por otro lado, la Figura 3 muestra la evolución del coeficiente de reducción de viruta. Como se ha indicado anteriormente en las Ecuaciones (1-5), el coeficiente de reducción de viruta permite obtener de forma indirecta el ángulo de cizalladura que es función del coeficiente de fricción entre el material de trabajo y el inserto de corte. Por tanto, cuanto mayor sea la capacidad de lubricación de la técnica de refrigeración empleada, el ángulo de cizalladura será mayor, lo que supone un coeficiente de reducción de viruta menor. La Figura 3 muestra las diferencias entre el coeficiente de reducción de viruta en función de las condiciones de corte y la técnica de refrigeración empleada. Los resultados muestran claramente que el proceso de arranque de viruta a velocidades de corte y avances altos permiten una mayor eficiencia del corte, puesto que el coeficiente de reducción se reduce. Al disminuir la velocidad de corte o la velocidad de avance se emplea una mayor energía en la deformación plástica de la viruta siendo el proceso más ineficiente. Sin embargo, es difícil apreciar claramente un cambio entre los coeficientes de reducción de viruta entre técnicas de refrigeración. Parece que la técnica por inundación da valores ligeramente inferiores lo que supone una menor fricción entre inserto y material de trabajo. La técnica de MQL parece dar valores ligeramente más altos que los obtenidos por inundación pero menores que los generados en seco o con aire comprimido, pero se trata de variaciones muy leves que pueden llegar a ser no significativas.

A pesar de no poderse observar una diferencia clara entre las técnicas de refrigeración y el coeficiente de reducción de viruta, las virutas generadas bajo cada técnica de refrigeración y en cada combinación de condiciones de corte sí muestran claras diferencias en cuanto a su color, lo que indica un cambio notable entre la temperatura que alcanza la viruta durante el corte y la refrigeración empleada. La Figura 4 muestra la viruta obtenida para unas condiciones de corte de 250 m/min y avance 0.4 mm/diente. Las virutas obtenidas por mecanizado en seco y con aire comprimido tienen una tonalidad azulada por efecto de la oxidación del acero al alcanzar elevadas temperaturas durante el corte. En cambio, las virutas obtenidas con el mecanizado refrigerado por inundación tienen un color plateado que indica una menor temperatura durante el corte. Con la tecnología MQL, el color de la viruta tiende a ser dorado, indicando una temperatura durante el corte intermedia entre el proceso en seco/aire y por inundación.

En definitiva parece que la técnica de refrigeración por inundación y el sistema MQL permiten mejores acabados superficiales y evitan la aparición del filo recrecido y recalcado a velocidades de corte y avance bajas. El sistema de MQL, con muy bajo consumo (aproximadamente 6 ml/h) permite obtener unas prestaciones muy similares a la refrigeración por inundación, lo que puede permitir una amplia mejora en cuanto a costes y a un menor impacto ambiental.

Figura 4. Viruta obtenida para cada una de las técnicas de refrigeración en condiciones de corte V_c y f_z de 250 m/min y 0,4 mm/diente respectivamente.



5. Conclusiones

Este trabajo ha estudiado la influencia de diferentes estrategias de refrigeración como refrigeración por inundación, por aire, con MQL y en seco, sobre la rugosidad superficial en operaciones de planeado de aceros al carbono. El estudio se ha centrado en estudiar la influencia en diferentes zonas de comportamiento, ya que para la aplicación y rango de parámetros de corte empleados, el proceso de arranque de viruta puede verse modificado por la aparición del filo recrecido o bien por el aplastamiento de la viruta al no alcanzar el espesor mínimo de viruta. El trabajo muestra la influencia en la rugosidad superficial de estas zonas de comportamiento y cómo influye la lubricación para minimizar estos efectos. Además, las estrategias de refrigeración fueron comparadas para analizar su impacto sobre la formación de viruta estimando el coeficiente de reducción de viruta en función de las condiciones de corte.

En líneas generales, se ha mostrado que la refrigeración MQL y por inundación presentan una rugosidad superficial mejor frente a las estrategias de refrigeración por aire comprimido o en seco. La rugosidad superficial empeora notablemente cuando las condiciones de corte empleadas son a muy baja velocidad de avance o a muy baja velocidad de corte y se emplea refrigeración por aire comprimido o en seco. Bajo estas condiciones, el fenómeno de filo recrecido y/o recalado es muy severo generando un acabado superficial muy deficiente. Por el contrario, el uso tanto de refrigeración por inundación como MQL consigue minimizar este fenómeno manteniendo una rugosidad superficial relativamente estable y reducida. Por otro lado, las diferencias entre refrigeración por inundación y MQL son muy ligeras lo que indica que el sistema MQL con muy poco consumo de lubricante puede ser una opción muy adecuada para reducir costes y minimizar el impacto medioambiental del sistema de refrigeración en mecanizado manteniendo la calidad superficial de la pieza.

Referencias

- Abellan-Nebot, J. V., Bruscas, G. M., Serrano, J., & Vila, C. (2017). Portability study of surface roughness models in milling. *Procedia Manufacturing*, 13, 593-600.
- Abellán-Nebot, J. V., Ortells, M., Bruscas, G., Serrano, J., & Gual, J. (2018, Mayo). Análisis de robustez de modelos de rugosidad superficial para el fresado de aceros al carbono. *XXII Congreso Internacional de Dirección e Ingeniería de Proyectos*, Madrid.
- Dhar, N. R., Islam, M. W., Islam, S., & Mithu, M. A. H. (2006). The influence of minimum quantity of lubrication (MQL) on cutting temperature, chip and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 171, 93–99.
- Grzesik, W. (1999). Experimental investigation of the influence of adhesion on the frictional

- conditions in the cutting process. *Tribology International*, 32, 15–23.
- Hadad, M., & Sadeghi, B. (2013). Minimum quantity lubrication-MQL turning of AISI 4140 steel alloy. *Journal of Cleaner Production*, 54, 332–343.
- Klocke, F., & Eisenblätter, G. (1997). Dry cutting. *Cirp Annals*, 46, 519–526.
- Popovic, M., Tanovic, L., & Ehmann, K. F. (2017). Cutting forces prediction: The experimental identification of orthogonal cutting coefficients. *FME Transactions*, 45, 459–467.
- Rahman, M., Kumar, A., & Salam, M. U. (2002). Experimental evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42, 539–547.
- Sreejith, P. S. (2008). Machining of 6061 aluminium alloy with MQL, dry and flooded lubricant conditions. *Materials Letters*, 62, 276–278.
- Stephenson, D. A., & Agapiou, J. S. (2016). *Metal cutting theory and practice*. CRC press.
- Trent, E. M., & Wright, P. K. (2000). *Metal Cutting*. Butterworth-Heinemann.
- Walker, T. (2013). The MQL Handbook-a Guide to machining with minimum quantity lubrication. Obtenido el 18 de mayo de 2018 desde <http://unist.com/the-mql-handbook.html>.
- Yalçın, B., Özgür, A. E., & Koru, M. (2009). The effects of various cooling strategies on surface roughness and tool wear during soft materials milling. *Materials and Design*, 30, 896–899.
- Yan, L., Yuan, S., & Liu, Q. (2012). Influence of minimum quantity lubrication parameters on tool wear and surface roughness in milling of forged steel. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 25, 419–429.