

# Mecanizado criogénico

Análisis de las ventajas de ese proceso con ejemplos de experiencias reales

El mecanizado criogénico, según recientes estudios, reduce más las fuerzas de corte, aumenta la vida de la herramienta y puede tener repercusión positiva sobre el acabado superficial y tensional de la pieza. Las ventajas del mecanizado criogénico sobre las aplicaciones convencionales son: Reducción significativa del coeficiente de fricción en el interfaz herramienta-viruta; incremento de la vida de la herramienta debido a una menor abrasión y desgaste químico e incremento de la tasa de arranque de material. En el siguiente artículo se presentan experiencias realizadas en este ámbito y el equipamiento empleado.

Los procesos de mecanizado en sus operaciones por lo habitual aplican estrategias de máximo volumen de viruta arrancado en el mínimo tiempo posible, sin que esta estrategia ponga en peligro la calidad de pieza. De esta estrategia, el mayor foco de problemas proviene del calor generado en el proceso de arranque, pudiendo provocar tensiones superficiales en las piezas, fisuras y microgrietas. Para combatir este problema es habitual emplear fluidos de corte, con los cuales se trata de reducir la temperatura alcanzada en el punto de corte. Esta ayuda facilita el incremento de condiciones de corte, volviendo otra vez al punto de inicio. Sin embargo, el empleo de fluidos de corte conlleva ciertos riesgos ambientales a tener en cuenta:

- Contaminación ambiental por evaporación de fluidos.
- Contaminación de suelo industrial por derrame.
- El fluido de corte es una sustancia peligrosa, por lo que es necesario hacer una gestión y procesamiento adecuados.
- Problemas de salud para los operarios por contaminación bacteriológica.
- Requerimiento de sistemas de recolección de fluidos en máquina, trasvase, almacenamiento y bombeo. En ocasiones

se requieren sistemas de refrigeración de la taladrina. Las máquinas y almacenamiento de la taladrina también supone un riesgo de fugas y contaminación de suelo.

Por otro lado, el coste de lubricantes se ha disparado en la última década, por lo que los costes de fabricación también se han disparado. Ello ha obligado a las empresas a tratar vías alternativas como el mecanizado en seco, con MQL (minimum quantity lubrication), o refrigeración a alta presión para tratar de reducir los costes y controlar la temperatura generada en el punto de corte. Las técnicas de mecanizado en seco o MQL son beneficiosas desde el punto de vista ambiental y equipamiento de máquina necesario, sin embargo afectan directamente al rendimiento y coste de la aplicación. El mecanizado de alta presión reduce las fuerzas de corte y calor generado, mientras que emplea el 50% de volumen de fluido de corte empleado en una instalación tradicional. Una nueva alternativa es el mecanizado criogénico, que según recientes estudios, reduce aún más las fuerzas de corte, aumenta la vida de la herramienta y puede tener repercusión positiva sobre el acabado superficial y tensional de la pieza.

## EL MECANIZADO CRIOGÉNICO

El mecanizado criogénico ofrece un ámbito interesante de investigación hacia la eficiencia y sostenibilidad de los procesos, como alternativa a los sistemas de lubricación basados en aceites (obtenidos principalmente de aceites minerales provenientes del petróleo).

En el mecanizado criogénico se utiliza un refrigerante criogénico (CO<sub>2</sub> o nitrógeno en estado líquido), el cual es suministrado a la región de corte de la herramienta - la parte expuesta a la más alta temperatura en el proceso de mecanizado - o a la propia pieza, con objeto de mejorar sus propiedades y maquinabilidad. La utilización de nitrógeno como refrigerante criogénico es habitual, puesto que el nitrógeno es un gas seguro, no combustible y no corrosivo. La Figura 1 compara un sistema convencional de refrigeración y lubricación con un dispositivo

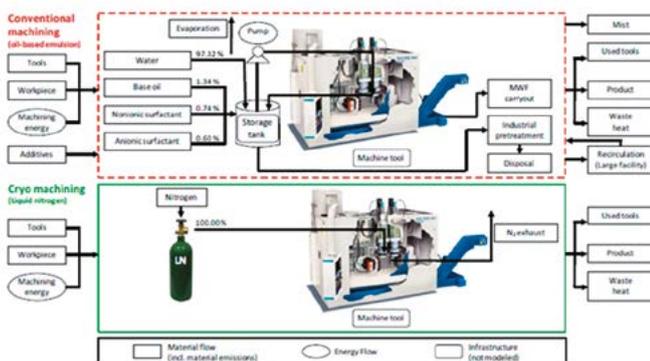


Figura 1: Comparación de sistema convencional con sistema criogénico. Fuente (Pusavec and Kopac, 2011)

<b>Condiciones de corte</b>	
Material pieza	42 CrMo4
Placas	CNMG CBN
Velocidad Corte	125 m/min
Avance	0.15
Prof. pasada	0.2 mm
Criterio fin de vida	Desgaste flanco Vb0.2
<b>Vida de la herramienta</b>	
Corte en seco	Tcorte 13 min
Refrig. Criogénica	Tcorte 32 min
Refrig. Criogénica + rompe-virutas	Tcorte 43 min

**Tabla 1: influencia de la refrigeración criogénica sobre el torneado de aceros templados**

criogénico, mostrando las entradas y salidas de material y energía. Mediante la refrigeración criogénica se consigue una drástica reducción de temperatura en el punto de corte, llegando a reducirse en término medio un 34%, el desgaste de flanco de la herramienta se reduce drásticamente aumentando así la vida de herramienta. El desgaste por abrasión y de la entalla se reduce también de manera drástica. Además, la calidad superficial y dimensional de las piezas mecanizadas también mejora de manera significativa.

Los temas de trabajos y aplicación en mecanizado criogénico incluyen (Pušavec and Kopač, 2011):

- Diseño y desarrollo de tecnologías criogénicas sostenibles (procesos mecanizados y sistemas de suministro de fluido) que puedan ser utilizados en diferentes operaciones de mecanizado.
- Optimización de sistemas de suministro de fluido a presión controlado, flujo de material y fase (líquido o vapor).
- Optimización de boquillas.
- Evaluación de mecanizado criogénico en casos o aplicaciones industriales.
- Identificación de demanda para nuevas aplicaciones y futuras oportunidades industriales.

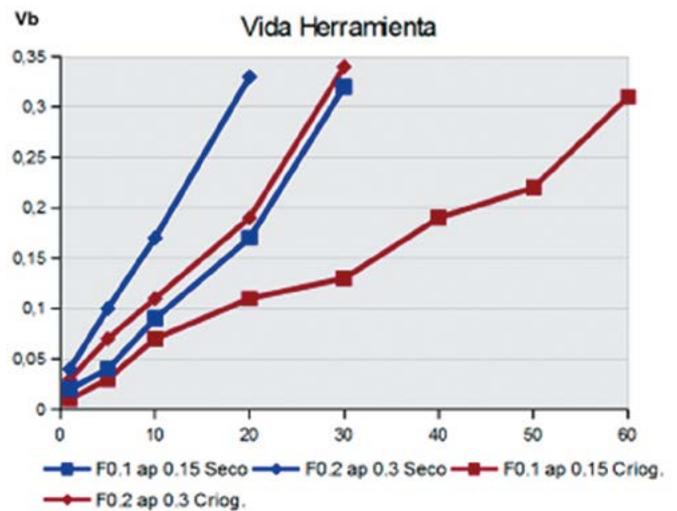
Las ventajas del mecanizado criogénico sobre las aplicaciones convencionales son:

- Reducción significativa del coeficiente de fricción en el interfaz herramienta-viruta.
- Incremento de la vida de la herramienta debido a una menor abrasión y desgaste químico (da Silva et al., 2006).
- Incremento de la tasa de arranque de material (MRR, Material Removal Rate) sin incremento del desgaste de la herramienta y menor coste por cambio de herramienta (incremento de productividad) (Pusavec et al., 2010).

En el sector de máquina-herramienta ya hay fabricantes que están empezando a ofertar opciones de refrigeración criogénica dentro de sus máquinas.

## EXPERIENCIAS REALIZADAS Y EQUIPAMIENTO EMPLEADO

Los trabajos se han centrado, inicialmente, en el diseño, instalación y puesta a punto de los equipos de aplicación de la



**Influencia de la refrigeración criogénica en la vida de herramienta para diferentes condiciones de corte**

refrigeración criogénica. Se ha elegido una solución basado en el soplado de CO<sub>2</sub> líquido sobre la zona de corte. El CO<sub>2</sub> en contacto con los materiales en la zona de corte se evapora absorbiendo el calor producido por la energía de corte.

La razón de la selección de CO<sub>2</sub> como fluido criogénico, a pesar de su relativamente alto punto de ebullición -57°C / 217°K, frente al punto de ebullición del nitrógeno líquido 90°K, se ha basado en aspectos técnicos y productivos:

- Seguridad de manipulación: el empleo de nitrógeno líquido LN2, exige engorrosas medidas de seguridad para evitar riesgos graves, e incluso mortales, de quemaduras para los operarios.
- Coste del precio del equipo y del gas a emplear, es mucho menor para el CO<sub>2</sub> que para el LN2.
- A pesar de las temperaturas menos frías, el poder frigorífico desarrollado por el CO<sub>2</sub> es suficiente para evacuar el calor producido en el corte de aceros y fundiciones.

**En el mecanizado criogénico se utiliza un refrigerante criogénico (CO<sub>2</sub> o nitrógeno en estado líquido), el cual es suministrado a la región de corte de la herramienta - la parte expuesta a la más alta temperatura en el proceso de mecanizado – o a la propia pieza, con objeto de mejorar sus propiedades y maquinabilidad**



V corte (m/min)	150-180
D.O.C. (mm)	0,1-0,2
f (mm/rev)	0,07-0,15
Geometría plaquitas	CNGA120408-04
Fin de vida	Vb>0,3

Tabla 2: parámetros de corte empleados en las pruebas

La refrigeración criogénica consigue reducir la temperatura de corte y tiene efecto en la vida de la herramienta, pero la efectividad del refrigeración criogénica dependiente de distintos factores:

- Geometría de la herramienta.
- Parámetros de corte, avance y velocidad de corte.

### Influencia de la geometría de la herramienta

Tradicionalmente las plaquitas de pCBN eran lisas sin ningún tipo de rompe-virutas, esto se traduce en la presencia de largas virutas que podrían enrollarse. Sin embargo, han salido al mercado nuevas plaquitas que ya incluyen ranuras rompe-virutas.

La geometría de la plaquita influye en el resultado. Si en la cara de desprendimiento hay ranuras paralelas a los filos de corte, por ejemplo rompe-virutas, estas ranuras facilitan la llegada del fluido a la zona de corte, favoreciendo la refrigeración criogénica.

En la Tabla 1 se refleja la favorable influencia de la refrigeración criogénica sobre el torneado de aceros templados, así mismo se ve el incremento del efecto favorecedor debido a las ranuras rompe-virutas.

### Influencia de las condiciones de corte

El efecto de la refrigeración criogénica disminuye cuando aumentan la velocidad y el avance. Cuando aumentan las condiciones de corte, la plasticidad en la zona de contacto herramienta-viruta aumenta obstruyendo la penetración del fluido. Rebajando la velocidad de corte se consigue llegar a un contacto elástico entre viruta y herramienta, permitiendo que el fluido

La tobera debe mantener el diseño adecuado para evitar las pérdidas de carga en el paso del fluido por rozamientos o turbulencias en el fluido, dirigir el chorro de salida hacia la zona de corte evitando dispersiones y pérdidas de poder frigorífico, manteniendo siempre un flujo coherente y concentrado

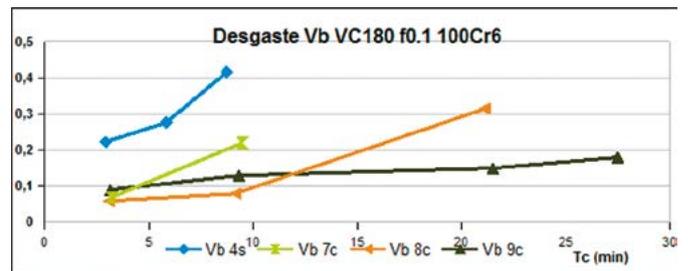


Figura 2: Influencia de la refrigeración criogénica en la vida de la herramienta

llegue a la zona de corte, obteniéndose reducciones de la temperatura de corte de unos 200°C. La disminución del avance, crea virutas más finas, que son empujadas por el chorro del fluido criogénico permitiendo lo que le permite llegar más cerca de la zona de contacto y mejorar la efectividad de la evacuación del calor.

En la gráfica se puede observar el efecto de la refrigeración criogénica sobre dos condiciones de corte:

- Severa f0.2, ap 0.3.
- Más ligera f0.1 ap 0.15.

En las condiciones severas, la refrigeración criogénica consigue aumentar la vida de herramienta desde 20 a 30 minutos. Sin embargo, en las condiciones más ligeras el incremento en la vida de la herramienta ha sido del 100%, se ha pasado de 30 a 60 minutos.

### TORNEADO DE ACEROS DE MUY ALTA DUREZA (64-66 HRC)

Tras los buenos resultados obtenidos empleando la refrigeración criogénica en el torneado de aceros templados de dureza media-alta, se pasó al torneado de aceros de muy alta dureza, durezas situadas en el entorno de 65HRC. La principal dificultad que plantean estos aceros es la extremadamente baja vida de herramienta que se obtiene debido a su muy baja maquinabilidad. Incluso empleando plaquitas de PCBN los altos desgastes producidos por la alta dureza de las piezas, llevan a bajas vidas de herramienta y malos resultados de acabado superficial. Estos malos resultados obligan a emplear parámetros de corte bajos, lo que resulta en procesos muy poco eficientes.



Figura 3: a) 2 boquillas dirigidas a las caras de incidencia y desprendimiento, b) boquilla doble hacia desprendimiento

### Pruebas de torneado

Para estudiar el efecto de la refrigeración criogénica se realizaron una serie de pruebas con refrigeración normal y con refrigeración criogénica, empleando piezas de 100Cr6. Estas piezas alcanzaban, aunque la profundidad de temple se reducía a 2-3mm. Los parámetros de corte, empleados en las pruebas, se recogen en la tabla 2:

En general, los resultados de las pruebas fueron satisfactorios, demostrando ventajas de la refrigeración criogénica frente al torneado duro en seco.

1. La vida de herramienta aumenta considerablemente con incrementos de 100-200%.
2. El acabado superficial mejora, los valores de rugosidad se mantienen en valores bajos durante un mayor tiempo de corte.
3. Estas mejoras están más acentuadas según aumenta la dificultad del mecanizado, condiciones más exigentes o dureza de pieza más alta.

Como ejemplo en la figura 2 se pueden ver los resultados obtenidos en cuanto a desgaste- vida de herramienta en las pruebas de torneado de 100Cr6 con las condiciones velocidad de corte 180 m/min avance 0,1 mm/rev. Los resultados obtenidos en las pruebas analizando el tiempo de corte ( $T_c$ ) y el desgaste fueron los siguientes:

- 4s seco.
- 7c y 8c refrigeración criogénica.
- 9c refrigeración criogénica con dos toberas.



### REFRIGERACIÓN CRIOGÉNICA: APLICACIÓN

Otro factor a destacar es la importancia de la aplicación del fluido criogénico. En las pruebas en las que se empleaban portas de refrigeración interna con diferentes toberas dirigidas a las caras de incidencia y desprendimiento, se mejoraba considerablemente los resultados de la aplicación de la refrigeración criogénica. Al dirigir el fluido simultáneamente a las dos zonas se actuaba sobre todas las zonas de contacto pieza-plaquita y viruta-plaquita mejorando mucho la vida de herramienta durante todo el corte.

Así, como se puede ver en la gráfica, para el caso de dos toberas el desgaste fue mucho menor 0,18 frente a 0,42, además se llegó a este desgaste tras un mayor tiempo de mecanizado, se alcanzaban los 27 minutos frente a los 21 minutos empleando una única boquilla de refrigeración.

En figura 3 se pueden ver diferentes herramientas con las estrategias de aplicación de fluido empleadas.

*Departamento de Mecanizado y Sistemas de Producción  
IK4-IDEKO*

La refrigeración criogénica consigue llegar a la zona de corte, reduciendo las temperaturas en la herramienta y produciendo una atmósfera inerte que rebaja considerablemente los desgastes por difusión, adhesión y abrasión; como resultado, dependiendo de las condiciones de corte, la vida de la herramienta podría aumentar desde un 20% hasta un 400%