

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

## FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA



### MAESTRÍA EN MECÁNICA, MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019

#### TEMA:

---

**“DESARROLLO DE UN SISTEMA HÍBRIDO “PLUG AND PLAY” DE  
LUBRICACIÓN PULVERIZADA CON NANOFLUIDO Y FLUIDO  
CRIOGÉNICO PARA MEJORAR LOS PROCESOS DE MECANIZADO POR  
ARRANQUE DE VIRUTA TORNEADO”**

---

Trabajo de titulación

Previa a la obtención del Grado Académico de Magíster en Mecánica, Mención  
Manufactura

**Autor:** Ing. Diego Rafael Arias Soto

**Director:** Ing. MSc. Diego Fernando Núñez Núñez

**Ambato - Ecuador**

**2021**

## **APROBACIÓN DEL TUTOR**

En calidad de tutor del Trabajo de Titulación presentado, previo a la obtención del título Magíster en Mecánica, Mención Manufactura. Con el tema: “DESARROLLO DE UN SISTEMA HÍBRIDO “PLUG AND PLAY” DE LUBRICACIÓN PULVERIZADA CON NANOFLUIDO Y FLUIDO CRIOGÉNICO PARA MEJORAR LOS PROCESOS DE MECANIZADO POR ARRANQUE DE VIRUTA TORNEADO”, elaborado por el Ing. Diego Rafael Arias Soto con cedula de identidad C.I. 1803798238 Maestrante de la MAESTRÍA EN MECÁNICA, MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019 de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica

Certifico:

- Que el presente Trabajo de Titulación es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Está concluido en su totalidad.

---

Ing. MSc. Diego Fernando Núñez Núñez

C. I.: 1803367729

**TUTOR**

## **AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación presentado con el tema: “DESARROLLO DE UN SISTEMA HÍBRIDO “PLUG AND PLAY” DE LUBRICACIÓN PULVERIZADA CON NANOFLUIDO Y FLUIDO CRIOGÉNICO PARA MEJORAR LOS PROCESOS DE MECANIZADO POR ARRANQUE DE VIRUTA TORNEADO”, le corresponde exclusivamente al: Ing. Diego Rafael Arias Soto, Autor bajo la Dirección del Ing. MSc. Diego Fernando Núñez Núñez, Director del Trabajo de Investigación; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.

---

Ing. Diego Rafael Arias Soto

C.I.: 1803798238

**AUTOR**

---

Ing. MSc. Diego Fernando Núñez Núñez

C. I.: 1803367729

**TUTOR**

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Investigación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad.

---

Ing. Diego Rafael Arias Soto

C.I.: 1803798238

**AUTOR**

## **APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO**

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica El Tribunal receptor del Trabajo de Titulación presidido por el Ingeniero Wilson Santiago Medina Robalino, Mg, e integrado por los señores: Ing. Cristian Fabián Pérez Salinas, Mg, Ing. Santiago Paúl Cabrera Anda, Mg, designados por la Unidad Académica de Titulación de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Trabajo de Titulación con el tema: “DESARROLLO DE UN SISTEMA HÍBRIDO “PLUG AND PLAY” DE LUBRICACIÓN PULVERIZADA CON NANOFUIDO Y FLUIDO CRIOGÉNICO PARA MEJORAR LOS PROCESOS DE MECANIZADO POR ARRANQUE DE VIRUTA TORNEADO”, elaborado y presentado por el Ing. Diego Rafael Arias Soto, para optar por el Grado Académico de Magíster en Mecánica, Mención Manufactura; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Investigación el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.

---

Ing. Wilson Santiago Medina Robalino, Mg.  
Presidente del Tribunal

---

Ing. Cristian Fabián Pérez Salinas, Mg.  
Miembro del Tribunal

---

Ing. Santiago Paúl Cabrera Anda, Mg.  
Miembro del Tribunal

## **DEDICATORIA**

*El presente trabajo está dedicado a la memoria de mis padres, Néstor y Elvia por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi vida estudiantil y profesional, con su amor, paciencia, esfuerzo y sus bendiciones derramadas desde el cielo.*

*Diego Arias*

## AGRADECIMIENTO

Mi entera gratitud a Dios quien, con su bendición, siempre guía e ilumina el rumbo de mi vida, a mi esposa e hija por ser mi inspiración, a mis queridos padres por haberme dado la luz de vida, a mi familia entera por su apoyo incondicional en todo momento, finalmente a los docentes de la carrera de Ingeniería Mecánica de la facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato de manera especial a mi director de tesis.

*Diego Arias*

## ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	iii
DERECHOS DE AUTOR .....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO .....	v
DEDICATORIA .....	vi
AGRADECIMIENTO .....	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN EJECUTIVO.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
CAPÍTULO I.....	1
MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Antecedentes Investigativos .....	1
1.2. Problema.....	12
1.3. Objetivos .....	12
1.4. Hipótesis.....	14
1.5. Justificación.....	14
CAPÍTULO II .....	17
METODOLOGÍA .....	17
2.1. Materiales y equipos .....	17
2.2. Metodología .....	23
2.2.1. Diseño experimental.....	24

2.2.2. Cálculo de parámetros de corte .....	25
2.2.3. Normativas aplicables para la validación de resultados.....	27
2.2.3.1. ISO 3685 .....	27
2.2.3.2. ISO 4287 .....	30
2.2.4. Instrumentos de medición .....	30
2.2.4.1. Microscopio de barrido SEM.....	30
2.2.4.2. Rugosímetro .....	31
2.2.5. Descripción metodológica de cada objetivo .....	32
2.2.6. Operacionalización de variables .....	33
2.2.6.1. Variable dependiente.....	33
2.2.6.1. Variable independiente.....	34
2.3. Plan de recolección, procesamiento y análisis de la información.....	34
CAPÍTULO III.....	37
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	37
3.1. Análisis y discusión de resultados .....	37
3.1.1. Rangos de funcionamiento del sistema de lubricación pulverizada MQL con nano fluido (MQL+TiO <sub>2</sub> ) y fluido criogénico (CO <sub>2</sub> ).....	37
3.1.2. Armario “plug and play” de lubricación pulverizada MQL con nano fluido y fluido criogénico .....	39
3.1.3. Adquisición de datos de los ensayos de rugosidad .....	43
3.1.4. Adquisición de datos de los ensayos de evaluación del desgaste de la herramienta de corte.....	51
3.1.5. Interpretación de resultados .....	67
3.1.5.1. <i>Rugosidad</i> .....	67
3.1.5.2. <i>Desgaste final de flanco a 60 minutos</i> .....	69
3.1.5.3. <i>Vida útil de la herramienta de corte en función de la velocidad de corte Vc</i> .....	70

3.1.5.4. <i>Evaluación de la vida útil de la herramienta de corte mediante cálculos (Ecuación de Taylor)</i> .....	78
3.1.5.5. <i>Mecanismos de desgaste</i> .....	84
3.1.5.6. <i>Verificación de la hipótesis</i> .....	85
CAPÍTULO IV .....	95
DESARROLLO DE LA PROPUESTA.....	95
4.1. Datos informativos:.....	95
4.2. Antecedentes de la propuesta:.....	95
4.3. Justificación de la propuesta: .....	96
4.4. Objetivos: .....	97
4.4.1. Objetivo General:.....	97
4.4.2. Objetivos Específicos:.....	97
4.3. Desarrollo:.....	98
4.3.1. Descripción de las especificaciones técnicas y de los parámetros de funcionamiento iniciales del sistema híbrido “plug and play” de lubricación pulverizada con nanofluido y fluido criogénico propuesto.....	98
4.3.2. Procedimiento para la instalación del sistema híbrido “Plug and Play” de lubricación pulverizada con nanofluido y fluido criogénico.....	102
4.3.4. Alcances y limitaciones del sistema híbrido “plug and play” propuesto...	106
CAPÍTULO V .....	108
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	108
5.1. Conclusiones .....	108
5.2. Recomendaciones.....	109
BIBLIOGRAFÍA: .....	110
ANEXOS .....	113

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades químicas de la tubería API L80 .....	18
Tabla 2 Propiedades mecánicas de la tubería API L80.....	18
Tabla 3 Configuración del inserto CNMG 120408 MF 2025 y parámetros de corte [18] .....	19
Tabla 4 Características generales del torno DMTG CDL 6241 .....	20
Tabla 5 Características del fluido criogénico.....	22
Tabla 6 Diseño experimental del acero API L80 .....	25
Tabla 7 Descripción metodológica para el cumplimiento de cada objetivo .....	32
Tabla 8 Operacionalización de la variable dependiente.....	33
Tabla 9 Operacionalización de la variable independiente.....	34
Tabla 10 Resultados obtenidos de las mediciones de rugosidad Ra .....	67
Tabla 11 Resultados obtenidos de las mediciones de rugosidad Rz .....	68
Tabla 12 Resumen de las mediciones de desgaste obtenidas a los 60 minutos de mecanizado.....	69
Tabla 13 Resumen de resultados de las mediciones de desgaste del filo de la herramienta en los primeros 60 minutos del experimento 1 y 5 .....	70
Tabla 14 Resumen de resultados de las mediciones de desgaste del filo de la herramienta en los .....	72
Tabla 15 Resumen de resultados de las mediciones de desgaste del filo de la herramienta en los primeros 60 minutos del experimento 3 y 7 .....	74
Tabla 16 Resumen de resultados de las mediciones de desgaste del filo de la herramienta en los primeros 60 minutos del experimento 4 y 8 .....	76
Tabla 17 Valores calculados para la obtención de la ecuación de Taylor con el fluido de corte taladrina .....	80
Tabla 18 Valores calculados para C.....	80

Tabla 19 Valores calculados para la obtención de la ecuación de Taylor con el fluido de corte híbrido .....	81
Tabla 20 Valores calculados para C .....	81
Tabla 21 Valores de Tc calculados mediante la ecuación de Taylor .....	82
Tabla 22 Comparación de los mecanismos de desgaste presentes en los dos procesos de mecanizado .....	84
Tabla 23 Distribución de T de Student [25].....	87
Tabla 24 Valores calculados para la obtención de t de prueba .....	89
Tabla 25 Distribución de T de Student [25].....	91
Tabla 26 Valores calculados para la obtención de t de prueba .....	93
Tabla 27 Descripción de los componentes del sistema híbrido – Vista general isométrica .....	99
Tabla 28 Descripción de los componentes del sistema de distribución del fluido criogénico – Vista general isométrica .....	101

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Mecanismos de desgaste en herramientas de corte de carburo cementado [3]..	2
Fig. 2 Mecanismos de desgaste presentes en la herramienta de corte utilizando el Sistema MQL como método de lubricación [4].....	2
Fig. 3 Mecanismos de desgaste presentes en la herramienta de corte utilizando enfriamiento criogénico [4].....	2
Fig. 4 Mecanismos de desgaste presentes en la herramienta de corte utilizando el sistema de lubricación – enfriamiento CryoMQL [4].....	3
Fig. 5 Diagrama de fases del CO2 [11].....	5
Fig. 6 Resultados de rugosidad y vida útil de la herramienta de corte en el mecanizado de Inconel 625 [4]. .....	8
Fig. 7 Configuración del Sistema de enfriamiento y lubricación Cryo MQL [4].....	9
Fig. 8 Tubería API L80 .....	17
Fig. 9 Sistema MQL (Mínima cantidad de lubricante) .....	21
Fig. 10 Vista general del Sistema de distribución de fluido criogénico.....	22
Fig. 11 Factores de control.....	24
Fig. 12 Resumen del criterio de vida útil de las herramientas de corte con recubrimiento de carburo sinterizado según ISO 3685 .....	28
Fig. 13 Resumen de los parámetros para la medición del desgaste según la norma ISO3685 .....	29
Fig. 14 Resumen de los parámetros de medición del perfil de rugosidad según la norma ISO 4287 .....	30
Fig. 15 Microscopía de barrido para la visualización del desgaste en las herramientas de corte .....	31
Fig. 16 Rugosímetro SJ 210.....	31
Fig. 17 Diagrama de flujo de recolección procesamiento y análisis de la información de la vida útil de la herramienta de corte .....	35

Fig. 18 Diagrama de flujo de recolección procesamiento y análisis de la información de la rugosidad superficial de la tubería.....	36
Fig. 19 Temperatura de trabajo del Sistema criogénico.....	37
Fig. 20 Esquema de la configuración del soporte para direccionar los flujos de CO2 y MQL.....	38
Fig. 21 Configuración del Sistema de lubricación MQL.....	39
Fig. 22 Composición del nano fluido.....	39
Fig. 23 Sistema de distribución de fluido criogénico inicial [20].....	40
Fig. 24 Cambios en el circuito de mezcla y ubicación en el armario.....	41
Fig. 25 Armario “plug and play” de lubricación pulverizada MQL con nano fluido y fluido criogénico .....	42
Fig. 26 Funcionamiento del sistema de distribución del fluido criogénico junto con el nano fluido MQL .....	42
Fig. 27 Representación gráfica de los resultados de Rugosidad Ra medidos .....	67
Fig. 28 Representación gráfica de los resultados de Rugosidad Rz medidos .....	69
Fig. 29 Desgaste final de flanco obtenido a los 60 minutos de mecanizado.....	70
Fig. 30 Vida útil de la herramienta de corte $V_c = 195$ m/min y $V_f = 0,1$ mm/rev ....	71
Fig. 31 Vida útil de la herramienta de corte proyectada a $V_c = 195$ m/min y $V_f = 0,1$ mm/rev .....	72
Fig. 32 Vida útil de la herramienta de corte proyectada a $V_c = 235$ m/min y $V_f = 0,1$ mm/rev .....	73
Fig. 33 Vida útil de la herramienta de corte proyectada a $V_c = 235$ m/min y $V_f = 0,1$ mm/rev .....	74
Fig. 34 Vida útil de la herramienta de corte proyectada a $V_c = 195$ m/min y $V_f = 0,2$ mm/rev .....	75
Fig. 35 Vida útil de la herramienta de corte proyectada a $V_c = 195$ m/min y $V_f = 0,2$ mm/rev .....	76

Fig. 36 Vida útil de la herramienta de corte proyectada a $V_c = 235$ m/min y $V_f = 0,2$ mm/rev .....	77
Fig. 37 Vida útil de la herramienta de corte proyectada a $V_c = 235$ m/min y $V_f = 0,2$ mm/rev .....	78
Fig. 38 $T_c$ de la herramienta CNMG120408 con la ecuación de Taylor comparativa para dos fluidos de corte .....	83
Fig. 39 Esquema inicial del sistema de distribución del fluido criogénico ejecutado en la primera etapa .....	96
Fig. 40 Vista general isométrica del sistema híbrido “plug and play” .....	98
Fig. 41 Vista general isométrica del sistema de distribución de fluido criogénico..	100
Fig. 42 Conexión de los cilindros .....	102
Fig. 43 Manipulación de las válvulas de alivio .....	103
Fig. 44 Configuración de la conexión del soporte de la boquilla y racores .....	103
Fig. 45 Posicionamiento del soporte en el torno .....	104
Fig. 46 Partes del sistema MQL.....	104
Fig. 47 Puesta en marcha del sistema de lubricación híbrida .....	105

## RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo investigativo se enfoca en el desarrollo de un sistema híbrido, que aumentó la calidad superficial del material mecanizado; se empleó CO<sub>2</sub> para el fluido criogénico y el sistema MQL con aceite biodegradable Unist Coolube 2210 EP con nano partículas de TiO<sub>2</sub> como aditivo para la lubricación pulverizada. El sistema se evaluó empleando una metodología experimental aplicando un diseño de experimentos de 8 corridas en donde se propuso ejecutar los experimentos con velocidades de corte de 235 y 195 m/min y avances de 0,1 y 0,2 mm/rev utilizando una herramienta de corte, un inserto de carburo sinterizado CNMG120408 en un material aplicable en la industria ecuatoriana como es, las tuberías de acero API L80 con diámetro exterior de 3.5 pulgadas. Para la medición del acabado superficial se empleó un instrumento de medición, el Rugosímetro Mitutoyo SJ-210, mientras que para la medición del desgaste del flanco de la herramienta de corte se evaluó el criterio de vida útil VB igual a 300 micrómetros en la zona B del inserto establecido por la norma ISO3685 con la ayuda de microscopía de barrido SEM. Los resultados obtenidos fueron favorables puesto que se obtuvo un aumento de la vida útil de la herramienta de corte de hasta el 40 por ciento, mientras que en el acabado superficial se alcanzaron rugosidades Ra mínimas de 0,4 micrómetros; por lo que se pudo establecer que el sistema propuesto es eficiente en este proceso de mecanizado.

**Palabras Clave:** sistema híbrido, lubricación pulverizada, acabado superficial, herramienta de corte, rugosidad.

## ABSTRACT

The present research work focuses on the development of a hybrid system, which increased the surface quality of the machined material; CO<sub>2</sub> was used for the cryogenic fluid and the MQL system with biodegradable oil Unist Coolube 2210 EP with TiO<sub>2</sub> nano particles as additive for the spray lubrication. The system was evaluated using an experimental methodology applying a design of experiments of 8 runs where it was proposed to run the experiments with cutting speeds of 235 and 195 m/min and feeds of 0.1 and 0.2 mm/rev using a cutting tool, a sintered carbide insert CNMG120408 in a material applicable in the Ecuadorian industry such as API L80 steel pipes with an outer diameter of 3.5 inches. For the measurement of the surface finish, a measuring instrument, the Mitutoyo SJ-210 roughness meter, was used, while for the measurement of the cutting tool flank wear, the VB life criterion equal to 300 micrometers in zone B of the insert established by the ISO3685 standard was evaluated with the help of SEM scanning microscopy. The results obtained were favorable since an increase in the cutting tool life of up to 40 percent was obtained, while in the surface finish minimum Ra roughness of 0.4 micrometers was achieved; therefore, it was possible to establish that the proposed system is efficient in this machining process.

**Key words:** hybrid system, spray lubrication, surface finish, cutting tool, roughness, roughness

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

### 1.1. Antecedentes Investigativos

Los procesos de mecanizado por arranque de viruta han sido empleados en diversas aplicaciones, por lo que se busca su optimización en diversos materiales para alcanzar el máximo rendimiento; involucrando parámetros como velocidades de corte, avance, profundidad de pasada y utilización de métodos de refrigeración con la finalidad de reducir tiempos de producción y alcanzar un máximo acabado superficial. Los métodos tradicionales como el de inundación han sido evaluados debido a que son poco amigables con el medio ambiente, y generan costos de producción adicionales relacionados con su tratamiento y eliminación [1].

Estos procesos se caracterizan por la amplia cantidad de variables que intervienen en el contacto de la herramienta de corte y el material a mecanizarse; algunos de estos son el filo de la herramienta, en especial su geometría (radio de la herramienta), fuerza de corte y temperatura en la zona de corte [2], algunos como adicionales a los parámetros de corte ya mencionados; otras consideraciones a tomar en cuenta son las propiedades físicas y químicas del elemento de trabajo ya que ciertos elementos pueden brindar mayor dureza al material y en otros casos, mayor ductilidad.

Los mecanismos de desgaste presentes en las herramientas de corte son la combinación de adhesión del material mecanizado en la herramienta de corte, adherencia y arrastre combinados, además de abrasión. En la figura 1 se muestra la microscopía SEM del desgaste de la herramienta de corte de carburo cementado, esta configuración fue obtenida de un estudio en donde evalúa los mecanismos de desgaste en las herramientas de corte en operaciones de torneado a alta velocidad en aleaciones de titanio, allí se observa un acercamiento en la punta de la herramienta a una magnificación de x120 con la presencia de la combinación de los tres mecanismos; el estudio reveló que el uso de MQL reduce la velocidad del desgaste [3].

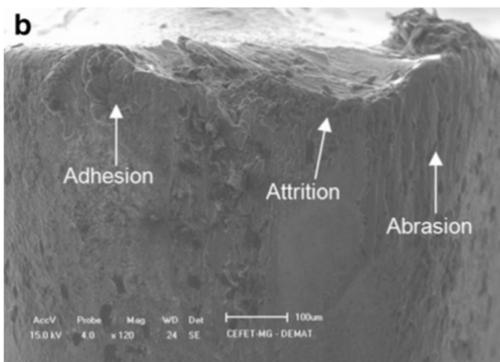


Fig. 1 Mecanismos de desgaste en herramientas de corte de carburo cementado [3]

Una comparación de cómo influye el tipo de fluido de corte en la progresión de los mecanismos de desgaste se muestra en las figuras 2, 3 y 4, tomando en cuenta diferentes métodos como es el caso del MQL, Cryo, y CryoMQL. Los resultados se muestran a través de imágenes obtenidas del análisis SEM con una velocidad de corte de 100 m/min utilizando la herramienta de corte CNGG 120404 (S05-S25) para el mecanizado de Inconel 625 [4].

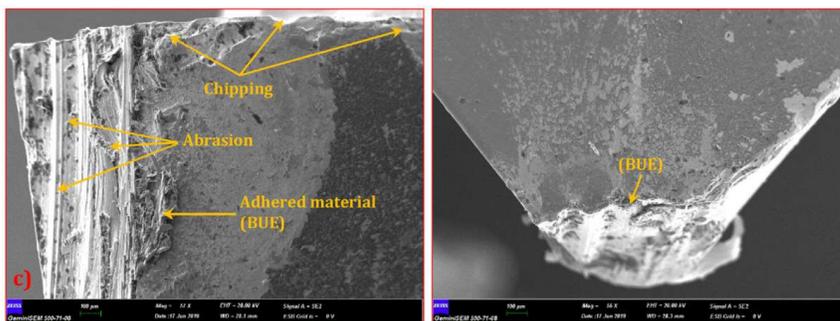


Fig. 2 Mecanismos de desgaste presentes en la herramienta de corte utilizando el Sistema MQL como método de lubricación [4]

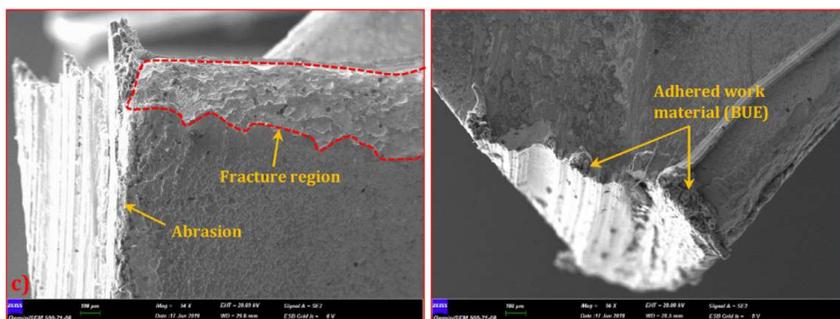


Fig. 3 Mecanismos de desgaste presentes en la herramienta de corte utilizando enfriamiento criogénico [4]

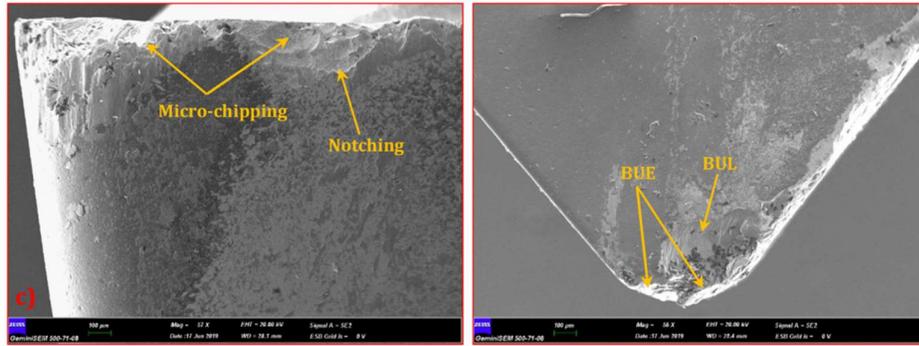


Fig. 4 Mecanismos de desgaste presentes en la herramienta de corte utilizando el sistema de lubricación – enfriamiento CryoMQL [4]

En la figura 2 se aprecia una mayor cantidad de mecanismos de desgaste como abrasión, regiones astilladas por el desprendimiento del material y adhesión de material con bordes recrecidos; en la figura 3 se observan otros mecanismos de desgaste como una zona fracturada en el flanco de la herramienta, abrasión, bordes recrecidos que se aprecian desde la vista superior o vista del cráter; finalmente, en la figura 4 se observa micro astillas, la formación de capas, pequeños bordes recrecidos difíciles de apreciar y pequeñas muescas. A pesar de que en las figuras no se aprecia la medición de VB visualmente se puede identificar el nivel de progreso que han presentado los mecanismos de desgaste en las 3 condiciones bajo los mismos parámetros de corte.

La generación de calor en el proceso de mecanizado influye directamente en la vida útil de la herramienta de corte, por lo que es un parámetro que puede ser manipulable dentro del proceso mediante la optimización de la refrigeración y lubricación. Utilizando un método de refrigeración criogénica se reduce la temperatura de corte en un 26% [1]. La herramienta de corte es afectada por la generación de calor en la zona primaria y secundaria de deformación plástica. El gradiente de temperatura que se produce en el proceso depende en gran manera de las condiciones, de la geometría de la herramienta y del fluido de corte [5].

En cuanto a los materiales, aquellos que requieren una mayor optimización son los que presentan una maquinabilidad muy pobre como el acero AISI 420 endurecido [1], materiales aeroespaciales (Aleaciones de titanio) [6] y aquellos que tienen aplicaciones de ultra – precisión [7].

Los aspectos fundamentales en donde se desea implementar mejoras dentro de los procesos de manufactura por arranque de viruta se basan en el enfriamiento y lubricación para alcanzar una mayor duración de la vida útil de la herramienta y un mejor acabado superficial, respectivamente. Con la finalidad de cumplir este objetivo se han implementado procesos no convencionales de enfriamiento [7]; sin embargo, los métodos de refrigeración y lubricación con mayor perspectiva hacia la aplicación dentro de la industria en general se basan en criogenia y la utilización de una mínima cantidad de lubricante (MQL); la aplicación de fluidos criogénicos permite aumentar la vida útil de la herramienta debido a que la endurece, mientras que, el uso de MQL con la adición de nano partículas permite mejorar el acabado superficial del material mecanizado por la óptima lubricación en el sistema [1].

El desarrollo y mejora del proceso de refrigeración y lubricación en conjunto ha conducido a su perfeccionamiento a partir de un sistema híbrido, este sistema combina el uso de un fluido criogénico ( $\text{CO}_2$  o Nitrógeno) y un sistema de mínima cantidad de lubricante (MQL), que puede incorporar el uso de aditivos como nano partículas minerales de cualquier tipo para lograr un enfriamiento óptimo de la zona de corte y una buena lubricación con el uso de mínimas cantidades de aceite amigable con el medio ambiente [8]. Luego de los avances tecnológicos correspondientes a la lubricación y refrigeración en procesos de mecanizado con MQL, se ha implementado sistemas de refrigeración criogénica, los fluidos más utilizados para este fin son nitrógeno líquido ( $\text{LN}_2$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) debido a la facilidad que tienen para bajar de temperatura. A una presión atmosférica el fluido  $\text{LN}_2$  puede trabajar a  $-195,8^\circ\text{C}$ , mientras que el  $\text{CO}_2$  puede retenerse en estado líquido a 57 bares. Para poder trabajar con  $\text{CO}_2$  en estado líquido, se debe seguir los parámetros de trabajo del diagrama de fases. El  $\text{CO}_2$  se almacena a altas presiones, y cuando se fusiona con el aire del ambiente puede cambiar de estado a hielo seco y gotas bajo  $-78,5^\circ\text{C}$ . Debido a que la utilización separada del  $\text{CO}_2$  como refrigerante carece de un sistema de lubricación, se han desarrollado sistemas de adaptación de lubricación por aerosol y refrigeración criogénica [9].

A nivel global, principalmente en países desarrollados, el uso de fluidos criogénicos en herramientas de corte es ampliamente usado, y en investigaciones previas se da a conocer que ofrece una mejora en el tiempo mínimo de producción que corresponde a

aproximadamente el 10%, en términos de costos de producción se puede obtener una mejora del 3.6% al utilizar enfriamiento con fluido criogénico [10].

Algunos parámetros que se toman en cuenta para la utilización del CO<sub>2</sub> como fluido criogénico es el control de las fases por las que atraviesa, al no ser un fluido corrosivo, no combustible y seguro, facilita su manipulación. Durante la aspersión del gas como fluido criogénico se produce un efecto Joule Thomson que permite la mezcla del 60% de gas y 40% de hielo, o como se conoce en el caso de este fluido, hielo seco; que funciona eficientemente como un fluido de corte sin residuos en el entorno de mecanizado. En este punto de sublimación a una atmosfera de presión en el ambiente la temperatura del fluido de corte gira en torno a -78°C como se aprecia en la figura 5 en donde se expone el diagrama de fases del CO<sub>2</sub> y su comportamiento en cuanto a presión y temperatura [11].

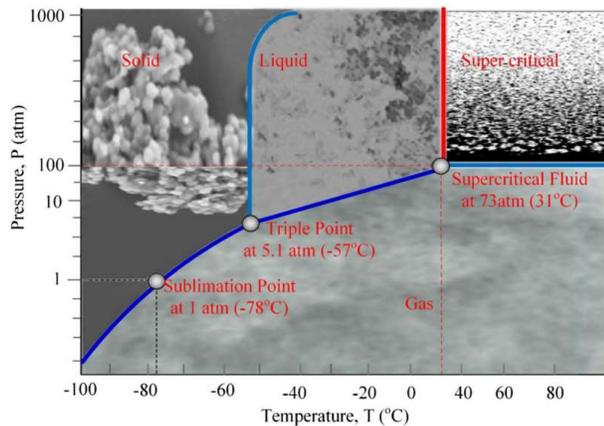


Fig. 5 Diagrama de fases del CO<sub>2</sub> [11]

Utilizando un método de refrigeración criogénica se reduce la temperatura de corte en un 26%. La productividad del mecanizado convencional cae dramáticamente a alta velocidad de corte debido al rápido desgaste de la herramienta. La lubricación híbrida permitiría incrementar la velocidad de avance de la cuchilla y reduciría el tiempo de cambio de una herramienta, incrementando el ahorro a largo plazo [5].

En un experimento desarrollado, la vida útil de la herramienta y la fuerza de corte utilizando mecanizado criogénico en el acero inoxidable SS202 se llevó a cabo en dos condiciones, mecanizado en seco y mecanizado criogénico usando nitrógeno líquido

que trabajó con una presión de  $5 \text{ kg/cm}^2$ . Las condiciones de corte se establecieron mediante un diseño de experimentos factorial, los resultados muestran reducción de la fuerza de corte utilizando una refrigeración criogénica debido a que se reduce el coeficiente de fricción en comparación de un mecanizado en seco. Este efecto es más evidente cuando se trabaja en altas velocidades ya que no se forman bordes de hielo en los flancos de la herramienta de corte; utilizando un fluido criogénico de nitrógeno líquido se obtuvo una disminución de la fuerza de corte del 14,83%. La relación que mantiene la refrigeración criogénica en cuanto a la vida útil de la herramienta es positiva ya que aumenta en un 37,39% en relación al mecanizado en seco debido a que reduce substancialmente la temperatura de corte en la zona de trabajo [12].

Implementando este sistema se puede encontrar un aumento de la vida útil de la herramienta del 63%, la temperatura de trabajo en la pieza de maquinado se redujo en un 38%, la temperatura de la herramienta de corte se redujo en un 43% y finalmente, la temperatura del flanco de la herramienta se redujo en un 55% [9].

Con este sistema de refrigeración los costos de maquinado se reducen significativamente, principalmente porque no se generan remanentes y las virutas no son contaminadas con materiales peligrosos que incluyen los fluidos de corte convencionales.

En cuanto a los sistemas de mínima cantidad de lubricante (MQL), una revisión de la literatura que se ha generado de las experimentaciones de la utilización de este sistema con la adición de nanopartículas presenta buenos resultados debido a las propiedades de transferencia de calor y lubricación que se obtienen de la creación de estos nanofluidos. El funcionamiento del sistema se basa en la aspersión del nanofluido atomizado mediante el flujo de aire a presión; este efecto deja una pequeña niebla de lubricante que forma una película tribológica delgada en el material y la herramienta de corte. Los mecanismos de lubricación presentes en el uso de los nanofluidos son similares a los de rodadura que forman la capa protectora con efectos de exfoliación y pulido en la superficie del elemento mecanizado [13].

Algunas de las mejoras en el uso de nanofluidos con dióxido de titanio, se presentaron en las experimentaciones con el uso de aceites vegetales para el mecanizado de aceros al carbono y aleaciones de aluminio utilizando herramientas de carburo sinterizado, el

resultado fue que brindaron mejor acabado superficial, reducción de la fuerza de corte, aumento de la vida útil de la herramienta de corte y mejoras en la morfología de la viruta. Un ejemplo de estas mejoras es el estudio comparativo que se hizo entre la utilización de nanofluidos MQL y sistema de enfriamiento criogénico, ya que esto presentó una mejora del 8,72% en el acabado superficial del mecanizado de Ti-6Al-4V, una reducción del 11,8% en las fuerzas de corte y un aumento del 23% en la vida útil de la herramienta de corte CNGA 120408 T01020 WG. Sin embargo, el enfriamiento con CO<sub>2</sub> criogénico ha proporcionado una reducción de la temperatura del 11,2% [11]. Algunos parámetros de configuración del sistema en esta experimentación tuvieron que ver con la fijación del sistema MQL en una presión de 4 bares y caudal de 2,5 ml/min, esto se hizo con la boquilla localizada a una distancia de 5 cm de la herramienta de corte con el flujo vertical hacia la zona de corte; por otro lado, al ser un estudio comparativo con el uso de fluidos criogénicos de CO<sub>2</sub>, este sistema se aplicó en la zona de corte a una presión de 8 bares con un diámetro de 0,5 mm a la salida de la boquilla de CO<sub>2</sub> [11].

La preparación de los nanofluidos es otro factor importante a considerarse, debido a que su estabilidad permitirá evitar aglomeraciones en el sistema, para esto, se debe asegurar una suspensión de las nanopartículas apropiada mediante diversos recursos, por ejemplo, una pequeña adición de lauril sulfato de sodio brinda mayor estabilidad en la suspensión; la mezcla se efectúa en función de la concentración de las nanopartículas en porcentajes del 0,1 – 0,5 y 1% en función de la proporción de aceite total [13].

Al encontrar ventajas en el uso de los sistemas de lubricación MQL y otro tipo de beneficios en el uso de sistemas de refrigeración criogénicos, en el proceso de investigación del análisis de la influencia de los fluidos de corte en el acabado superficial del material mecanizado, y la vida útil de la herramienta de corte, se plantea el uso de los dos métodos de lubricación y enfriamiento; en un estudio de la evaluación de estos parámetros en Inconel 625 utilizando MQL, enfriamiento criogénico y CryoMQL o lubricación híbrida [4] se encontraron resultados muy interesantes respecto al rendimiento de este último método planteado.

Los parámetros empleados para la experimentación fueron velocidades de corte de 50, 75 y 100 mm/rev; profundidad de corte de 0,5 mm y velocidad de avance de 0,12

m/rev. El sistema de lubricación MQL fue configurado en 8 bares con un caudal 50 ml/h a un ángulo de 30° localizado a 15 mm de distancia con una salida en la boquilla de 2 mm. En este caso el fluido criogénico empleado fue nitrógeno líquido direccionado con una boquilla con diámetro de salida de 3mm situado a 15 mm de distancia a 30° y una temperatura de -196°C [4].

Luego de las experimentaciones, los resultados obtenidos fueron favorables puesto que la menor rugosidad encontrada fue de 1,42 μm brindando el mejor acabado superficial mediante el uso del sistema Cryo MQL, esto representa una mejoría del 24,82% respecto al uso únicamente del enfriamiento criogénico. En cuanto a la disminución de la temperatura en la zona de corte, el sistema Cryo MQL obtuvo el menor valor (200°C), que en comparación del sistema MQL se redujo en un 24,9%; en el estudio también se expone que este parámetro depende de la velocidad de corte debido a que mientras aumenta este valor, aumentan otros parámetros como la fricción. Uno de los puntos a evaluar el rendimiento de los fluidos de corte es la vida útil de la herramienta de corte, en este estudio se encontró que los métodos más eficaces para la duración de la herramienta de corte son MQL y CryoMQL, el valor de desgaste mínimo obtenido se presentó utilizando Cryo MQL (0,211 mm) a un volumen de remoción de viruta constante en todas las experimentaciones [4].

En la figura 6 se aprecia gráficamente el contraste entre los diferentes métodos de lubricación – enfriamiento utilizados y la rugosidad, así como también la vida útil de la herramienta de corte.

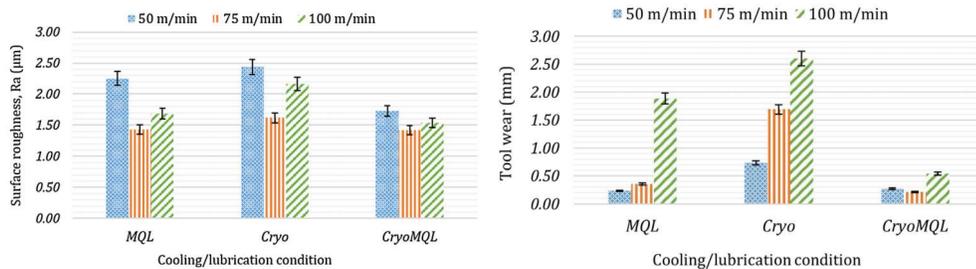


Fig. 6 Resultados de rugosidad y vida útil de la herramienta de corte en el mecanizado de Inconel 625 [4].

Otra investigación utilizando el CO<sub>2</sub> como fluido criogénico combinado con MQL tuvo resultados favorables en cuanto al aumento de la vida útil de la herramienta de corte, aumentando su vida útil en un 93,5%; los parámetros de configuración del sistema empleados fueron el caudal de salida del MQL (100 mL/h) y CO<sub>2</sub> líquido

inyectado a 14 bares. Los parámetros de corte en este caso fueron velocidad de corte de 120 m/min, avance de 0,12 mm/diente, profundidad de corte de 0,2 mm [14].

Un esquema de la utilización de fluidos criogénicos acompañados de MQL para el mecanizado mediante procesos de torneado se muestra en la figura 7 donde además se explican las etapas de medición de resultados. Del material o pieza de trabajo torneado se toman mediciones de rugosidad, el parámetro más relevante para determinar el acabado superficial del elemento es la rugosidad promedio o Ra; otro de los resultados importantes del estudio es la medición del desgaste de la herramienta de corte que corresponde al análisis de la medición de VB en el flanco principal de los insertos, es decir, la zona que entra en contacto directo con la pieza de trabajo. Para alcanzar a medir y reconocer los mecanismos de desgaste que influyen en el progreso de este fenómeno se utilizan instrumentos de visualización potentes como la microscopía de barrido SEM. En ocasiones el estudio también involucra la toma de temperaturas mediante cámaras termográficas adaptadas al sistema o mediante termocuplas para revisar la zona de corte. El sistema MQL se compone del recipiente a presión en donde se almacena el aceite biodegradable junto con las nanopartículas, el cual se presuriza mediante una fuente de aire externa que inyecta el aire a presiones de hasta 5 bares como se ha mostrado en algunas bibliografías; mientras que el sistema criogénico puede variar dependiendo del fluido empleado para la experimentación.

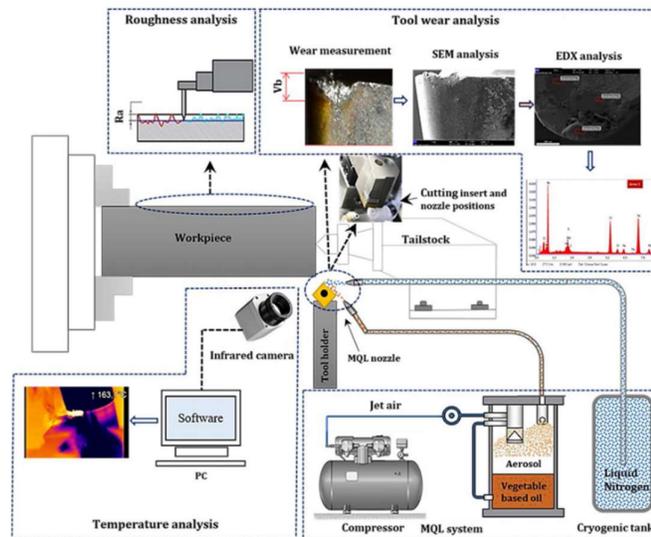


Fig. 7 Configuración del Sistema de enfriamiento y lubricación Cryo MQL [4]

A nivel nacional, la lubricación híbrida con sistemas de mínima cantidad de lubricante es totalmente nueva; en la actualidad en nuestro medio no se cuenta con muchos equipos destinados a este fin debido a múltiples factores, uno de ellos es el desconocimiento de procesos de manufactura eco sustentables por parte del sector metalmeccánico que opta por el uso de aceites emulsificables para lograr el enfriamiento del elemento de corte, sin conocer que estos afectan a la salud de los operarios e incrementan los costos de producción debido a que luego de su vida útil son considerados como desechos peligrosos y es necesario brindar tratamientos especiales para poder eliminarlos.

Los parámetros utilizados en la investigación de evaluación del rendimiento del mecanizado empleando dos tipos de fluidos de corte como el sistema MQL y el uso de aceites emulsificables tradicionales se llevaron a cabo con un caudal de 480 ml/h junto con aceite Unist Coolube 2210 EP biodegradable, con una presión de salida de 2 bares en el MQL; mientras que en el sistema de lubricación por inundación se utilizó un aceite emulsificable a un caudal de 6,5 L/min. Algunos de los resultados obtenidos en la experimentación fueron una mejoría del rendimiento, hasta en un 50% con la disminución del uso de herramientas de corte [8]. En el Ecuador al no ser una tecnología muy desarrollada, en especial, el uso de sistemas eco sustentables para procesos de mecanizado, muchos de los componentes que se utilizan para el sistema de lubricación y enfriamiento son importados, tales como las alternativas de aceite biodegradable existentes.

En el país existen pocas investigaciones referentes a métodos no convencionales de refrigeración en procesos de torneado y fresado, por lo que el uso de lubricación híbrida (CO<sub>2</sub> + MQL) es novedoso, principalmente aplicable para procesos con materiales difíciles de mecanizar como los aceros endurecidos, aleaciones y aceros inoxidable que se encuentran disponibles en la localidad.

Otra medida importante de sostenibilidad que debe considerarse se refiere a los residuos producidos durante el mecanizado. Los productos de desecho están conectados principalmente a los refrigerantes a base de aceite emulsificables, herramientas de corte desgastadas y virutas. En estudios previos se supone que la cantidad de viruta producida es igual para casos de mecanizado con taladrina y con refrigeración criogénica. Esto da como resultado costos iguales relacionados con la

compactación de virutas (incluida la trituración si es necesario), que se requiere para facilitar el transporte. Sin embargo, el mecanizado convencional incluye un costo adicional para la separación del aceite soluble de la viruta, que requiere descremado, separación de las partículas duras por medio de filtración, separación de emulsión y tratamiento del agua separada [15].

Dentro de los métodos de lubricación y enfriamiento eco sustentables, se estima que los costos de mecanizado con el sistema CryoMQL son inferiores entre todos los métodos propuestos, como el mecanizado en seco, lubricación MQL, mecanizado criogénico y mecanizado CryoMQL, debido a un ahorro significativo en la utilización de herramientas de corte utilizando este método comparado los demás, este resultado se presenta por el aumento de la vida útil de la herramienta de corte. El estudio de evaluación de maquinabilidad y rendimiento económico en el proceso de torneado muestra los factores involucrados en el cálculo del costo de mecanizado con la utilización de métodos eco sustentables, entre estos factores se incluye el costo de mecanizado inactivo (ubicación del material y recorrido de la torreta sin mecanizar), consumo de electricidad del torno que es influenciado por la eficiencia o rendimiento del mecanizado; y en este caso el mecanizado criogénico presenta un consumo inferior del 45% comparado con MQL y seco, también se incluye el costos generales de mecanizado como la depreciación del torno, costos de operación, etc. El costo de los insertos se incluye en este análisis, y es un parámetro que directamente se suma al costo total en función del número de insertos utilizados con su precio en el mercado; el costo del fluido de corte o método de lubricación enfriamiento va en función del caudal y tiempo de mecanizado. Al sumar todos los costos para la obtención del costo de mecanizado total, se encontró que el método con menor valor es utilizando un sistema criogénico, seguido por el método MQL y finalmente el mecanizado en seco; por lo tanto, es correcto hacer una estimación de la reducción del costo al utilizar un sistema híbrido CryoMQL debido a la optimización del proceso de mecanizado en general que se obtiene de la aplicación de este [16].

## **1.2.Problema**

En el Ecuador existe una deficiente producción eco sustentable en la industria, y aún no se ha innovado en los procesos productivos en el área del mecanizado, lo cual sigue presentando dificultades en cuanto al mecanizado de materiales endurecidos o con poca maquinabilidad, pero que, sin embargo, representan una parte fundamental en el desarrollo productivo del país, como en el caso de la industria petrolera, manufacturera, automotriz, entre otras.

La utilización de aceites emulsificables en los procesos de mecanizado brindan desventajas en la fabricación de elementos por arranque de virutas como la aparición de costos adicionales para el tratamiento del fluido criogénico y procesos de eliminación y limpieza que ocupan largos períodos de trabajo, otras dificultades presentes son la limitación en el control de los parámetros de corte, lo que conlleva largos tiempos de mecanizado, y en muchas aplicaciones también se necesitan post procesos para alcanzar el acabado superficial óptimo para el elemento.

Por otro lado, los aceites emulsificables, al ser fluidos que se mezclan con agua, pueden generar problemas en la piel, su evaporación puede generar una niebla tóxica que al entrar en las vías respiratorias del operario es perjudicial para su salud; si no se brinda un correcto tratamiento en el agua utilizada para la emulsificación, y un correcto control de la calidad del agua, esto también puede dar lugar para la descomposición y creación de hongos y bacterias en el fluido de corte; como consecuencia de su utilización a largo plazo, este tipo de fluidos también pueden dar origen a enfermedades catastróficas.

## **1.3.Objetivos**

### ***1.3.1. Objetivo General:***

Desarrollar un sistema híbrido “plug and play” de lubricación pulverizada con nanofluido y fluido criogénico para mejorar los procesos de mecanizado por arranque de viruta en torneado.

### **1.3.2. Objetivos Específicos:**

- Realizar una búsqueda bibliográfica de los procesos MQL y lubricación criogénica para determinar su eficiencia con respecto a otros métodos.

Para el cumplimiento de este objetivo se elaborará una búsqueda bibliográfica de estudios previos del rendimiento del método de lubricación propuesto con respecto al acabado superficial y vida útil de la herramienta de corte en materiales de difícil maquinabilidad.

- Identificar los rangos de funcionamiento del sistema de lubricación pulverizada MQL con nano fluido (MQL+TiO<sub>2</sub>) y fluido criogénico (CO<sub>2</sub>) para procesos de mecanizado por arranque de viruta mediante investigación bibliográfica.

En este objetivo mediante la bibliografía consultada se obtendrán los parámetros de funcionamiento para el sistema criogénico como presión y velocidad, así también para el caso del nanofluido (concentración y métodos de mezcla) y configuración del MQL (presión y caudal). Localmente también en este objetivo se parte de un punto inicial de investigaciones previas acerca de la configuración del sistema Cryo MQL con nanofluido para adaptarlo en el mecanizado de API L80.

- Instalar el sistema de lubricación pulverizada MQL con nano fluido y fluido criogénico para procesos de mecanizado por arranque de viruta mediante un armario “plug and play”.

La instalación del sistema se ejecutará mediante una conexión de tubería de acero inoxidable y válvulas para el sistema de mezcla de CO<sub>2</sub> líquido y gaseoso para direccionarlo con una boquilla en la zona de corte junto con la boquilla del MQL; se construirá un armario para ordenar el circuito de tuberías y válvulas con la finalidad de conectar el sistema y ejecutarlo en operaciones de torneado.

- Evaluar el funcionamiento del sistema híbrido “plug and play” de lubricación pulverizada con nanofluido y fluido criogénico en el proceso de cilindrado de tuberías API L80

Se elaborarán pruebas de funcionamiento del sistema utilizando probetas de acero API L80 para el proceso de cilindrado con la herramienta de corte CNMG 120408 MF 2025 para evaluar la vida útil mediante microscopía SEM y la medición del desgaste VB en el flanco de la herramienta con los parámetros descritos en la norma ISO 3685; en el caso de la evaluación del acabado superficial de la tubería se utilizará un rugosímetro SJ 210 Mitutoyo con la norma ISO 4287; para poder comparar el rendimiento del fluido de corte, se elaborarán ensayos con el mismo material y la misma herramienta de corte bajo los mismos parámetros con la utilización de taladrina como método de enfriamiento y lubricación con la finalidad de evaluar los resultados de los dos métodos.

#### **1.4. Hipótesis**

El sistema híbrido “plug and play” de lubricación pulverizada con nano fluido y fluido criogénico permitirá mejorar el desempeño de la herramienta de mecanizado por arranque de viruta torneado.

##### ***1.4.1. Variable dependiente***

El desempeño de los procesos de mecanizado por arranque de viruta torneado.

##### ***1.4.2. Variable independiente***

El sistema híbrido “plug and play” de lubricación pulverizada con nano fluido y fluido criogénico.

#### **1.5. Justificación**

El presente trabajo investigativo se enfoca en el alcance del desarrollo de un sistema híbrido de lubricación compuesta de nano fluido y fluido criogénico que puede tener aplicación en los procesos de maquinado más utilizados en la industria manufacturera del Ecuador. Tradicionalmente estos procesos de remoción de sistema para la fabricación de elementos mecánicos se han efectuado con métodos de inundación utilizando taladrina, este lubricante se compone de una sustancia emulsionada que contiene agua y un 10% de aceite que, frecuentemente se presenta en la industria como un medio de refrigeración de buena calidad pero que presenta varias dificultades para

el operador, la herramienta de corte, el acabado superficial del elemento a maquinarse y el medio ambiente.

A nivel mundial se han planteado innovaciones dentro de los procesos de manufactura por arranque de viruta debido a que es uno de los principales métodos de producción, por lo que estas mejoras se han enfocado en dos ejes principales como es el rendimiento del mecanizado y la introducción en el mercado de sistemas eco sustentables; el Ecuador no es la excepción en cuanto a las necesidades del sector como mejoría de rendimiento de estos procesos, y por otro lado, también es importante cuidar del medio ambiente, además de la salud e integridad de las personas que intervienen en el proceso.

En cuanto al rendimiento de mecanizado, en el Ecuador existen materiales que tienen poca maquinabilidad como los aceros endurecidos, aleaciones, aceros inoxidable, entre otros, también existen aplicaciones específicas que requieren un elevado control de calidad en cuando al acabado superficial de los elementos producidos mediante mecanizado en torno o fresa; al plantear el proceso productivo con la finalidad de alcanzar las prestaciones mecánicas del elemento en muchas ocasiones es necesario hacer un post proceso de manufactura con otros procesos de mecanizado para alcanzar la rugosidad superficial; en muchas ocasiones para no sacrificar la calidad superficial se sacrifican los parámetros de corte extendiendo el tiempo de mecanizado. Como consecuencia de esto se busca implementar los sistemas de lubricación – enfriamiento híbrido con el uso de nanofluidos para lograr utilizar condiciones de corte óptimas y alcanzar un buen acabado superficial, o incluso mejor que el que se obtiene con el uso de sistemas de lubricación y enfriamiento tradicionales, como es el caso de la taladrina.

Por otro lado, los sistemas eco sustentables son más eficientes ya que brindan un ahorro en futuros problemas con la salud de los trabajadores, así como también la eliminación de gastos relacionados con el tratamiento de sustancias peligrosas y problemas en la limpieza de la máquina por residuos de este fluido, que después de algún tiempo entra en descomposición. Según la NTP 317, los fluidos lubricantes pueden afectar al operador y causarle lesiones cutáneas, alteraciones al tracto respiratorio y cáncer. El contacto con la piel y estas sustancias causa lesiones que se obtienen como consecuencia de su utilización debido a la naturaleza irritante y la

agresividad de los componentes que contienen. Debido al cambio de temperatura en el proceso de maquinado, estos forman aerosoles y nieblas que al inhalarse produce irritación de vías respiratorias, neumonías, fibrosis pulmonar, asma, también cabe agregar el potencial cancerígeno de estos productos por sus aditivos que pueden contener [17].

En el desarrollo del proyecto se buscan los parámetros más eficientes de funcionamiento del sistema para optimizar los recursos necesarios en el proceso de mecanizado. Mediante el control del fluido lubricante y refrigerante se puede incrementar de manera considerable la vida útil de la herramienta de corte que será evaluada mediante la normativa ISO 3685; este proceso también mejorará el acabado superficial de los elementos mecanizados que serán evaluados mediante la norma ISO4287.

## CAPÍTULO II

### METODOLOGÍA

#### 2.1. Materiales y equipos

Para la fase experimental del proyecto se necesitan algunos insumos que se describen a continuación.

##### **Probetas de acero API L80**

El material que se evaluó en los experimentos es el acero API L80 que contiene las características que se muestran en la tabla 1 y 2 para lo cual se plantea utilizar probetas de esta tubería con medidas de 220 mm de longitud y 88,9 mm (3,5”) de diámetro exterior. Se realizó un proceso de cilindrado exterior para las evaluaciones de acabado superficial bajo las condiciones del diseño de experimentos planteadas más adelante.



*Fig. 8 Tubería API L80*

Tabla 1 Propiedades químicas de la tubería API L80

<b>Composición química %</b>						
	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Al</b>
<b>L</b>	0,29	0,25	1,30	0,025	0,025	-
<b>P</b>	0,30	0,27	1,35	0,024	0,030	-
<b>P</b>	0,30	0,30	1,32	0,030	0,030	-

Fuente: Hebei Zhongkuang Steel Pipe Manufacturing CO. LTD.

Tabla 2 Propiedades mecánicas de la tubería API L80

<b>Propiedades mecánicas</b>		
<b>T.S. (MPa)</b>	<b>Y.S (MPa)</b>	<b>E.L. (%)</b>
700	590	28

Fuente: Hebei Zhongkuang Steel Pipe Manufacturing CO. LTD.

En la figura 8 en la parte superior se observa que la tubería contiene en la superficie una capa fina de un material de color naranja con la textura de óxido, e inmediatamente debajo de esta capa hay un material de color negro; este material corresponde a un recubrimiento que se le brinda a las tuberías destinadas a aplicaciones con una elevada exposición a ambientes que dan origen al deterioro por el proceso oxidativo como es, el sector petrolero, que, generalmente opera en condiciones extremas. Este recubrimiento corresponde a un material denominado calamita que está conformado de óxido de hierro y otros minerales que le brindan una protección a la corrosión a las tuberías tanto interna como externamente.

### **Insertos**

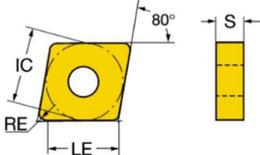
Insertos para mecanizado en torno CNMG 120408 MF 2025; de geometría rómbica de 80° con incidencia de ángulo de corte de 0° grados y radio de punta de 0,8 mm. Esta plaquita además cuenta con dos filos por cara con sujeción en el centro. Al ser un inserto para acabados, pertenece a las calidades 2025 con recubrimiento CVD [18]. Las especificaciones de su geometría, velocidades de corte recomendadas y el portainseros que corresponde a esta plaquita se presentan en la tabla 3.

Los recubrimientos de CVD de las plaquitas de corte tienen buenas propiedades como la resistencia al desgaste y resistencia a cambios críticos de temperatura; están compuestos de carbonitruro de titanio (TiNC), alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y nitruro de titanio (TiN) [19].

Esta herramienta de corte pertenece al grupo ISO M para corte de elementos de acero inoxidable; sin embargo, al ser un trabajo investigativo de continuidad en la investigación de la efectividad del uso de sistemas de lubricación – enfriamiento híbridos con nanofluido MQL se debe utilizar la misma herramienta de corte especificada en proyectos previos de la universidad; sin embargo, esta herramienta tiene prestaciones mecánicas superiores por lo que cubre las necesidades del material propuesto para este trabajo investigativo.

En la tabla 9 se pueden observar las recomendaciones de corte del fabricante, y dentro del paréntesis los valores máximos y mínimos del rango de operación que tiene este inserto, para el trabajo investigativo se selecciona una profundidad de corte de 0,4 mm un avance de 0,1 y 0,2 mm/rev y una velocidad de corte de 195 m/min y 235 m/min con los cuales posteriormente se calculará la velocidad del mandril.

Tabla 3 Configuración del inserto CNMG 120408 MF 2025 y parámetros de corte [18]

Características de la herramienta de corte					
 	<p>Valores iniciales</p> <table border="1"> <tr> <td rowspan="3" style="background-color: yellow; text-align: center; vertical-align: middle; font-size: 2em;">M</td> <td>ap 0.6 mm(0.15-1.5)</td> </tr> <tr> <td>fn 0.2 mm/r(0.1-0.4)</td> </tr> <tr> <td>vc 195 m/min(235-145)</td> </tr> </table>	M	ap 0.6 mm(0.15-1.5)	fn 0.2 mm/r(0.1-0.4)	vc 195 m/min(235-145)
M	ap 0.6 mm(0.15-1.5)				
	fn 0.2 mm/r(0.1-0.4)				
	vc 195 m/min(235-145)				
<p>Porta insertos: MClnr 2020 k12</p> 					

#### Torno DMTG CDL 6241

Torno semiautomático con motor de 3 a 4,5 kW; el rango de operaciones del torno se describe en la tabla 4.

Tabla 4 Características generales del torno DMTG CDL 6241

Parámetro	Valor
Avance longitudinal	0,06 – 0,82 mm
Avance transversal	0,017 – 0,242 mm
Rango de velocidad del mandril	32 – 2000 rpm
Dimensiones generales	750 mm – 2000 x 1020 x 1210 mm
Peso	1378 kg

Fotografía



### Sistema MQL

Sistema de mínima cantidad de lubricante que combina aceite y aire, es un dispositivo útil para procesos de manufactura que requieren el uso de lubricación, es una vía útil como reemplazo del sistema de inundación. Contiene un regulador de caudal con un máximo de 480 ml/h con una presión de salida de 2 bar. En la figura 9 se muestra la fotografía del sistema que se compone del tanque de almacenamiento del aceite, el sistema de distribución y actuador.



*Fig. 9 Sistema MQL (Mínima cantidad de lubricante)*

### **Sistema de distribución de fluido criogénico**

Se compone de un arreglo de tubing en acero inoxidable y un circuito de mezcla de fluido criogénico de CO<sub>2</sub> mediante electroválvulas, válvulas antirretorno, acoples en T y acoples rectos, racores, codos, reguladores de caudal, y principalmente el tanque de CO<sub>2</sub> líquido y CO<sub>2</sub> gaseoso.

En la figura 10 se muestra el sistema inicial con el que se configuraron algunos parámetros para el funcionamiento del sistema criogénico, en este prototipo se adaptó el CO<sub>2</sub> líquido mediante un cilindro con la boquilla hacia abajo para obtener las características del fluido criogénico en esta fase. Otra de las condiciones iniciales que se obtuvieron con el análisis del primer prototipo es la formación de una nube criogénica con la utilización de un racor a 45° de aplicación en una boquilla adaptada para que el flujo del MQL con las nanopartículas se una con el fluido criogénico hacia la zona de corte [20].

En este estudio se analizarán condiciones de corte similares y se harán mejores adaptaciones del circuito electrónico, mejoras en el circuito de mezcla de CO<sub>2</sub> y la creación de un armario que contenga todo el sistema con la finalidad de facilitar su adaptación en cualquier sistema de mecanizado.



*Fig. 10 Vista general del Sistema de distribución de fluido criogénico*

### **Nano fluido**

Se compone de la mezcla de aceite biodegradable, nanopartículas de titanio y otros aditivos que permiten que la mezcla se mantenga homogénea. En la tabla 5 se muestran las principales características del aceite seleccionado, además de las propiedades de las nanopartículas de titanio.

*Tabla 5 Características del fluido criogénico*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Denominación:	Unist Coolube 2210 EP
Aplicación:	Metales ferrosos
Grado:	100% natural, no deja residuos, no cambia sus propiedades, totalmente de grado cosmético
Viscosidad:	(40°C) 16 cSt
Capacidad de vertido:	(-20 °C) 10,4
Gravedad específica:	(25°C) 0,93
Fotografía:	



Fuente: [21]

Denominación:	TiO <sub>2</sub> (Dióxido de titanio)
Aplicación:	Protección UV, limpieza de aguas residuales, antibacterial, transferencia de calor, material conductor [22]
Tamaño de partículas	100 nm
Fase:	Anatasa
Fotografía:	

## 2.2. Metodología

En este apartado se tomará en cuenta el proceso de evaluación de resultados, así como las normas utilizadas para validarlos. Como primera instancia se abarca el diseño de experimentos, luego el cálculo de parámetros de corte, normativas e instrumentos de medición, además de la descripción de la metodología aplicable para el cumplimiento de cada objetivo.

### 2.2.1. Diseño experimental

Es un método que permite identificar los factores de control en un experimento, es decir, aquellos que son controlables y que minimizan los factores de ruido (no controlables); mediante arreglos ortogonales que permiten que se balanceen equitativamente los factores de control. Dentro de este diseño se especifican los factores de control que se configurarán para el experimento.

#### Factores de control:

En la figura 11 se muestran los factores de control del proceso de mecanizado, y sus niveles, en este caso son 3 factores de control: (a) Fluido de corte, (b) velocidad de corte, y (c) avance; mientras que cada factor tiene dos niveles. En el caso del fluido de corte es la lubricación propuesta en este estudio, lubricación pulverizada con nano fluido y fluido criogénico, y el método de inundación de taladrina; para la velocidad de corte, dos velocidades, 235 m/min y 195 m/min; y finalmente para el avance 0,1 mm/rev y 0,2 mm/rev.

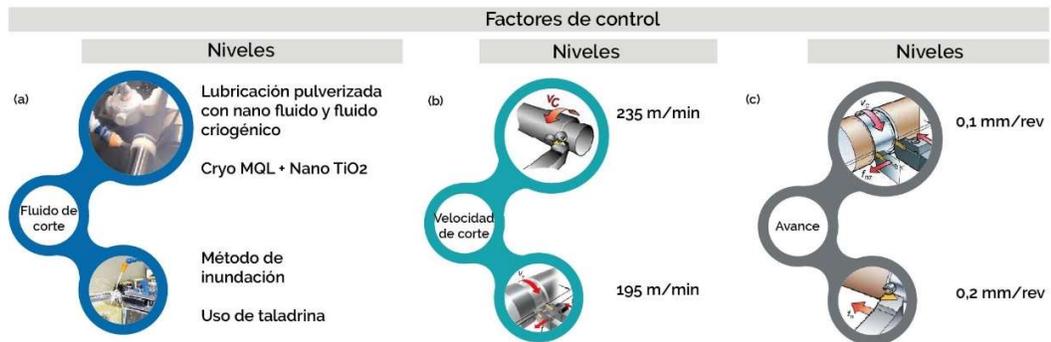


Fig. 11 Factores de control

Estos factores de control dan como resultado un diseño ortogonal Taguchi L8 como se muestra en la tabla 6 en donde se ejecutarán 8 corridas de 3 factores con 2 niveles que conforman el experimento completo que se llevará a cabo.

Tabla 6 Diseño experimental del acero API L80

Diseño Taguchi	N° Corrida	Factores		
		Fluido de corte	Velocidad de corte	Avance
$L = n^F$ $L = 2^3$ $L = 8$	1	Cryo MQL + Nano TiO <sub>2</sub>	235 m/min	0,1 mm/rev
	2	Taladrina	235 m/min	0,1 mm/rev
	3	Cryo MQL + Nano TiO <sub>2</sub>	235 m/min	0,2 mm/rev
	4	Taladrina	235 m/min	0,2 mm/rev
	5	Cryo MQL + Nano TiO <sub>2</sub>	195 m/min	0,1 mm/rev
	6	Taladrina	195 m/min	0,1 mm/rev
	7	Cryo MQL + Nano TiO <sub>2</sub>	195 m/min	0,2 mm/rev
	8	Taladrina	195 m/min	0,2 mm/rev

### 2.2.2. Cálculo de parámetros de corte

Mediante los factores seleccionados se calculan los parámetros de corte que son aquellos que van a utilizarse en los experimentos.

#### Velocidad del mandril nivel 1:

$$n = \frac{Vc * 1000}{\pi * d}$$

Donde:

$n$  = Velocidad del mandril en rpm

$Vc$  = Velocidad de corte tomada de las especificaciones del fabricante en m/min

$d$  = diámetro de elemento a mecanizarse en mm

$$n = \frac{235 * 1000}{\pi * 88,9}$$

$$n = 841 \text{ rpm}$$

**Velocidad del mandril nivel 2:**

$$n = \frac{Vc * 1000}{\pi * d}$$

$$n = \frac{195 * 1000}{\pi * 88,9}$$

$$n = 698 \text{ rpm}$$

**Velocidad de avance nivel 1-1:**

$$Va = fn * n$$

Donde:

*Va = Velocidad de avance en mm/min*

*n = Velocidad del husillo del mandril en rpm*

$$Va = 0,1 * 841$$

$$Va = 84,1 \text{ mm/min}$$

**Velocidad de avance nivel 1-2:**

$$Va = fn * n$$

$$Va = 0,2 * 841$$

$$Va = 168,2 \text{ mm/min}$$

**Velocidad de avance nivel 2-1:**

$$Va = fn * n$$

$$Va = 0,1 * 698$$

$$Va = 69,8 \text{ mm/min}$$

**Velocidad de avance nivel 2-2:**

$$Va = fn * n$$

$$Va = 0,2 * 698$$

$$Va = 139,6 \text{ mm/min}$$

**2.2.3. Normativas aplicables para la validación de resultados****2.2.3.1. ISO 3685**

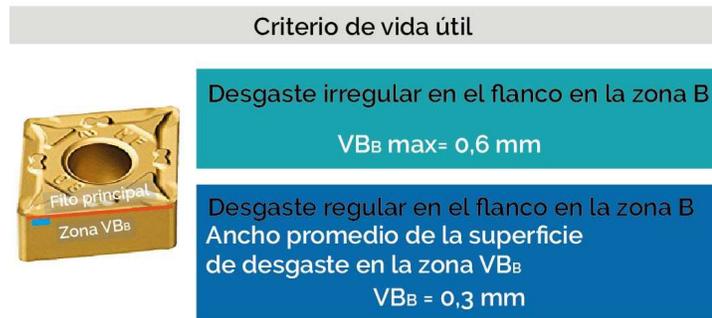
El alcance de esta normativa abarca el procedimiento recomendado para la evaluación de la vida útil de herramientas de corte de acero rápido, carburo cementado y cerámicas en procesos de torneado. La evaluación se basa en la medición del desgaste por el deterioro del uso de la herramienta de corte [23].

Los parámetros que determinan la vida útil de las herramientas de corte usadas para procesos de torneado se basan en el material, herramientas, fluido de corte, condiciones de corte, equipos de medición, medición del desgaste, y la interpretación de resultados.

Para determinar el desgaste de la herramienta de corte, se puede definir como un cambio en su geometría durante el corte por la pérdida gradual del material de la herramienta de corte o su deformación.

La vida útil de la herramienta de corte se define a través del tiempo de corte requerido que puede alcanzar la herramienta hasta llegar al criterio de vida útil, que, en este caso, según la normativa es el límite o umbral determinado del valor medido de desgaste.

El criterio de vida útil para las herramientas con recubrimiento de carburo sinterizado se muestra en la figura 12.



*Fig. 12 Resumen del criterio de vida útil de las herramientas de corte con recubrimiento de carburo sinterizado según ISO 3685*

En el siguiente diagrama se describe el proceso de medición del desgaste de la herramienta de corte tomando en cuenta los criterios que especifica la norma ISO 3685 para la medición y presentación de resultados de desgaste en el flanco de la herramienta de corte y determinación de vida útil.

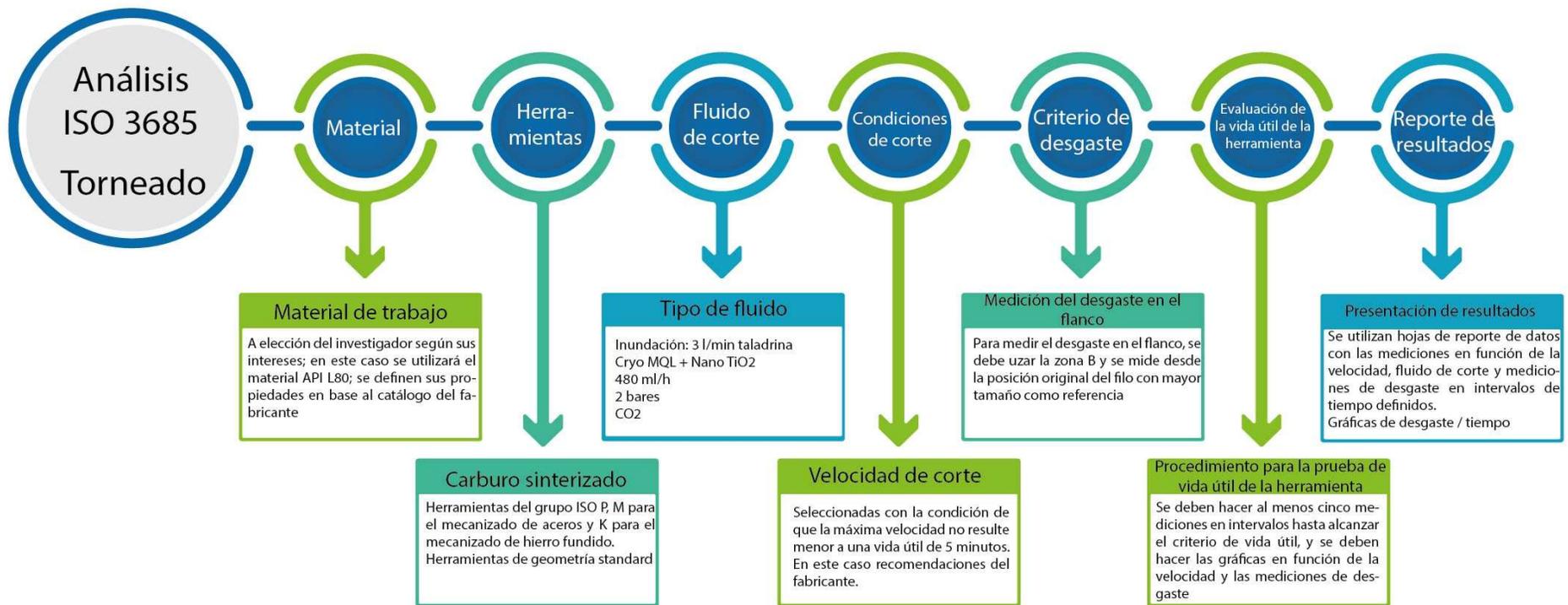


Fig. 13 Resumen de los parámetros para la medición del desgaste según la norma ISO3685

### 2.2.3.2. ISO 4287

Esta normativa establece los parámetros de medición del perfil de rugosidad en superficies mediante métodos de perfilado [24].

Los instrumentos de medición de rugosidad deben cumplir con estos parámetros para poder establecer la rugosidad, y, por lo tanto, el acabado superficial que se espera obtener de cada proceso de mecanizado en torno.

En la figura 14 se muestra un diagrama con los componentes esenciales para la definición de rugosidad de este trabajo experimental.

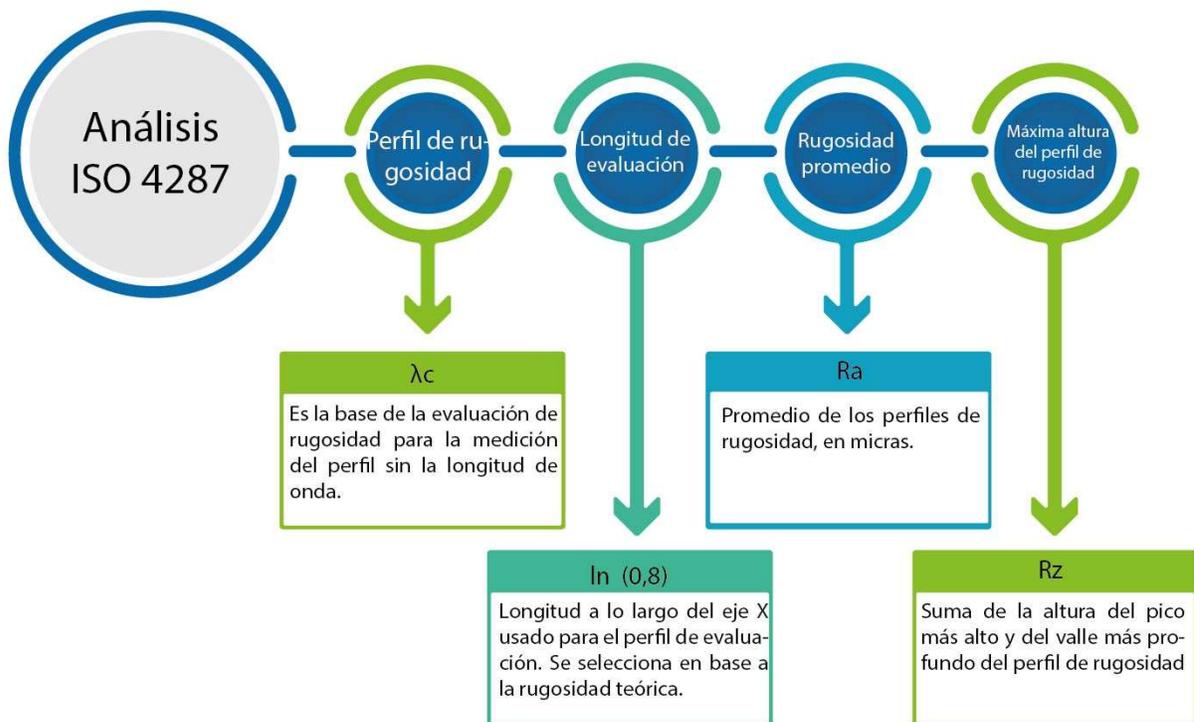


Fig. 14 Resumen de los parámetros de medición del perfil de rugosidad según la norma ISO 4287

## 2.2.4. Instrumentos de medición

### 2.2.4.1. Microscopio de barrido SEM

Es un equipo para facilitar la visualización del desgaste de la herramienta de corte debido a su elevada potencia y rangos de trabajo al vacío; permite la visualización a través de filamentos de tungsteno y cuatro lentes. El rango de operación del microscopio es de 20 kV, magnificación de 150 X en la zona de desgaste B del flanco

principal de la herramienta de corte. En la figura 15 se muestra el método de visualización del microscopio mediante el cual se efectúa las mediciones de desgaste hasta evaluar el criterio de desgaste establecido por la norma ISO 3685.



*Fig. 15 Microscopía de barrido para la visualización del desgaste en las herramientas de corte*

#### **2.2.4.2. Rugosímetro**

El instrumento de medición de la marca Mitutoyo modelo SJ 210 determina el perfil de rugosidad mediante el procedimiento que establece la norma ISO 4287: 1997 para las mediciones de Ra y Rz, es un instrumento que cuenta con una galga de calibración con un error admisible de 0,005 micras, y permite la configuración de parámetros como la longitud de evaluación que, para calidades superficiales teóricas en función del radio de punta de la herramienta, se obtiene una longitud  $l_n$  de 0,8 mm. En la figura 16 se muestran el equipo de medición, así como algunas de sus configuraciones de operación.



*Fig. 16 Rugosímetro SJ 210*

### 2.2.5. Descripción metodológica de cada objetivo

El trabajo investigativo es de enfoque cuantitativo puesto que se establecen condiciones de análisis específicas que deben cumplirse para determinar la verificación de la hipótesis, los parámetros que se obtienen del experimento son: la rugosidad superficial Ra y Rz obtenidas en micras, y el criterio de desgaste que debe alcanzar VB de 0,3 mm en un tiempo de trabajo determinado.

Tabla 7 Descripción metodológica para el cumplimiento de cada objetivo

<b>Objetivos específicos:</b>	<b>Objetivo 1</b>	<b>Objetivo 2</b>	<b>Objetivo 3</b>	<b>Objetivo 4</b>
<b>Tipo de investigación</b>	Bibliográfico		Experimental De campo	
<b>Método de investigación</b>	Deductivo directo		Hipotético deductivo Diseño experimental	
<b>Técnica de investigación</b>	Investigación documental		Construcción	Observación científica o directa
<b>Instrumento de investigación</b>	Artículos publicados y normativas, catálogos.	Normas ISO 3685 e ISO 4287 Catálogos Fichas de resultados Resultados de otros trabajos investigativos	Armario de sistema de distribución de fluido criogénico y nano fluido Componentes de control Componentes de distribución y mezcla de gases	Fichas de resultados de medición de rugosidad Fichas de resultados de medición de desgaste del flanco de la herramienta de corte Gráficas Verificación de la hipótesis

En la tabla 7 se presenta una descripción metodológica detallada que será utilizada para el cumplimiento de cada objetivo. En el caso de la búsqueda de parámetros de funcionamiento del sistema criogénico, así como de la evaluación de su rendimiento se hace una investigación documental a través del método deductivo directo debido a que se tienen las premisas de que, si el material mecanizado tiene un buen acabado superficial, y la herramienta de corte tiene un incremento en su vida útil, entonces el

fluido de corte propuesto es eficaz, para eso se obtiene la información documental de artículos publicados que han utilizado estas premisas para la obtención de sus resultados.

En cuanto a la evaluación de los experimentos que corresponde al objetivo tres y cuatro, se usa una investigación experimental y de campo mediante un método hipotético deductivo con un diseño experimental basado en las premisas planteadas inicialmente, para lo cual se efectúa la construcción del armario, la ejecución de los experimentos y el registro de sus datos observados a través del fichaje.

### 2.2.6. Operacionalización de variables

A través de la tabla 8 y 9 se presenta la operacionalización de variables, es decir, los parámetros de funcionamiento de las variables del experimento.

#### 2.2.6.1. Variable dependiente

El desempeño de los procesos de mecanizado por arranque de viruta torneado.

*Tabla 8 Operacionalización de la variable dependiente*

<b>Variable dependiente</b>	<b>Categoría</b>	<b>Indicador</b>	<b>Ítems</b>	<b>Técnicas e instrumentos</b>
Para evaluar el desempeño del proceso de mecanizado se parte del acabado superficial del material mecanizado, y de la vida útil de la herramienta de corte utilizada en el proceso de mecanizado en torno comparado con los mismos parámetros utilizando el método de lubricación con taladrina.	Acabado superficial	Ra	Longitud de muestreo ln=0.8 mm	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Observación</li> <li>- Rugosímetro</li> <li>- Hojas de registros de datos</li> </ul>
		Rz		
	Vida útil de la herramienta de corte	Criterio de desgaste	VB = 0,3 mm	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Observación</li> <li>- Microscopio SEM</li> <li>- Hojas de registros de datos</li> </ul>
			VB máx= 0,6 mm	

### 2.2.6.1. Variable independiente

El sistema híbrido plug and play” de lubricación pulverizada con nano fluido y fluido criogénico.

Tabla 9 Operacionalización de la variable independiente

Variable dependiente	Categoría	Indicador	Ítems	Técnicas e instrumentos	
Se compone del sistema de mezcla y distribución de fluido criogénico, el sistema MQL y la distribución de la unión de los dos fluidos mediante una boquilla direccionada a la zona de corte.	Fluido criogénico	CO2	Líquido	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hojas de registros de datos</li> <li>- Materiales de construcción</li> <li>- Reguladores de presión</li> <li>- Balanza analítica</li> <li>- Impresión 3D</li> <li>- Coolube 2210 EP</li> <li>- TiO2</li> </ul>	
			Gaseoso		
	Sistema de mezcla del fluido criogénico	Presión de operación	60 bares		
			Sistema MQL		Presión
	Aceite lubricante	Grado de degradación	Caudal		480 ml/h
			-Biodegradable		-Taladrina
	Nano partículas	Toxicidad	No tóxicas		
	Nano fluido	Concentración	0,5% de concentración de las nano partículas en función del peso del aceite		
	Boquilla de aplicación	Número de racores	1		
			Ángulo de direccionamiento		45°

### 2.3. Plan de recolección, procesamiento y análisis de la información

Mediante el diagrama de la figura 17 y 18 se presenta el flujo de trabajo para el diseño experimental en todas sus etapas.

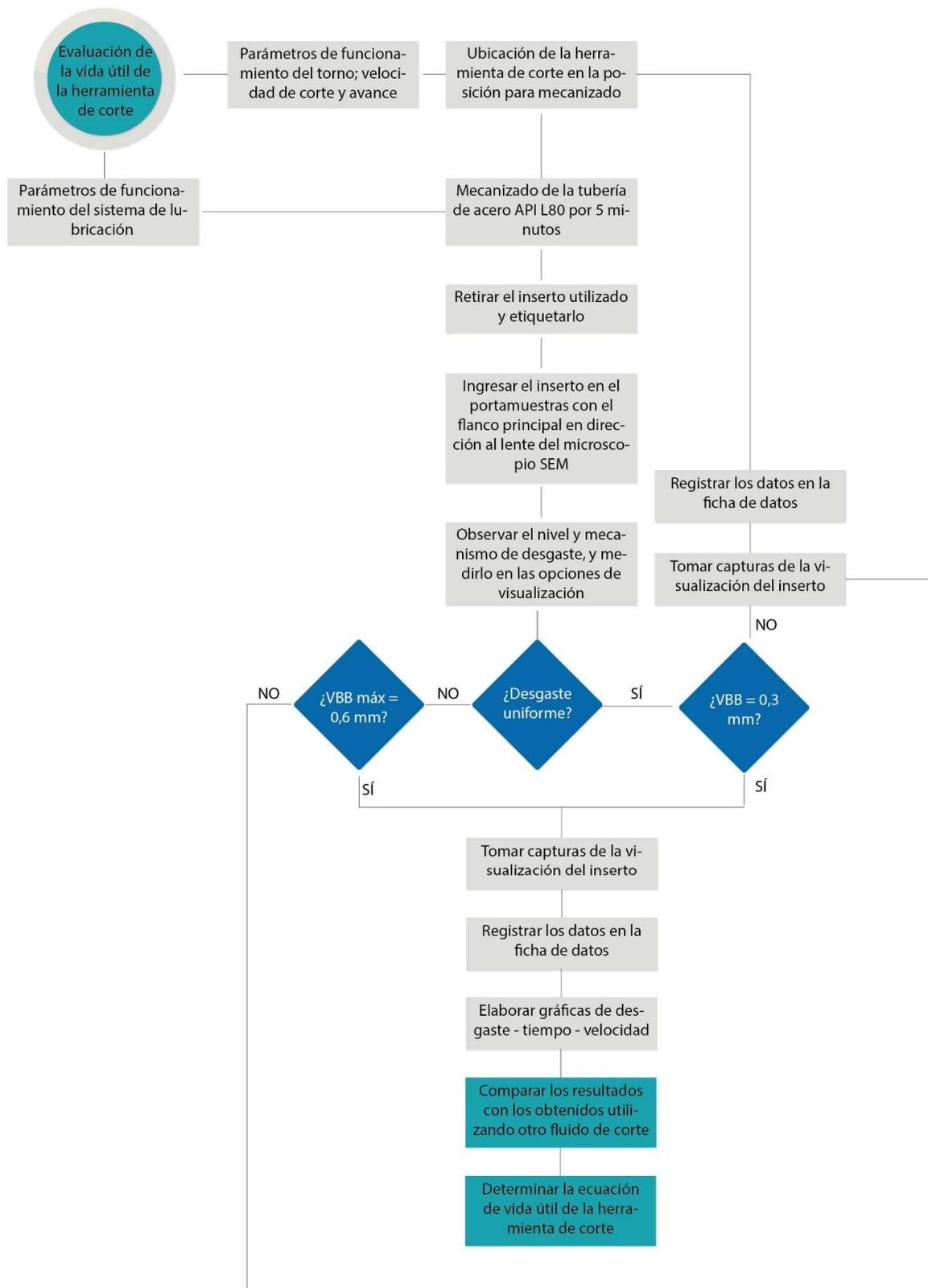


Fig. 17 Diagrama de flujo de recolección procesamiento y análisis de la información de la vida útil de la herramienta de corte



Fig. 18 Diagrama de flujo de recolección procesamiento y análisis de la información de la rugosidad superficial de la tubería

## CAPÍTULO III

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Análisis y discusión de resultados

##### 3.1.1. Rangos de funcionamiento del sistema de lubricación pulverizada MQL con nano fluido (MQL+TiO<sub>2</sub>) y fluido criogénico (CO<sub>2</sub>)

El sistema criogénico opera dentro de los rangos ubicados bajo el punto triple del diagrama de fases del CO<sub>2</sub> puesto que en esas condiciones se obtiene una mezcla de gas y hielo; esta combinación es la que permite refrigerar el sistema a temperaturas muy inferiores; en este caso se alcanzaron temperaturas de -62 °C utilizando el sistema propuesto, la medición se hizo con termocuplas.



*Fig. 19 Temperatura de trabajo del Sistema criogénico*

En cuanto a la velocidad de salida del fluido criogénico, como referencia mediante bibliografía se conoce que el CO<sub>2</sub> sale por la boquilla a una velocidad de 400 m/s [14] [20] tomando en cuenta el diseño de la boquilla que se compone un racor de 1,5 mm de diámetro acoplado en un soporte que dirige el flujo de CO<sub>2</sub> junto con el flujo del nano fluido MQL.

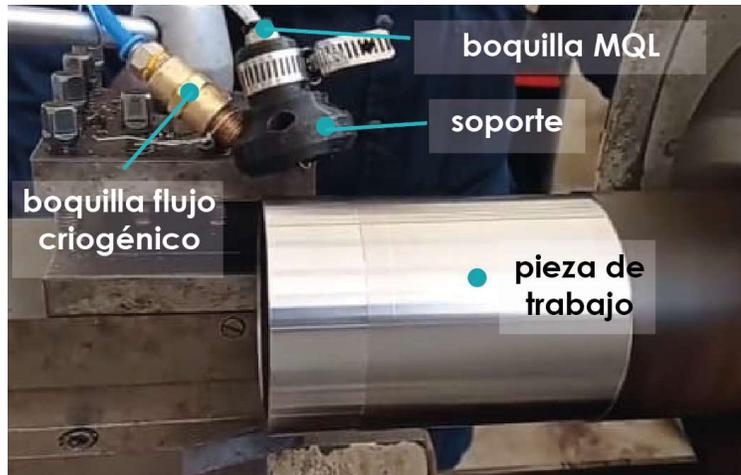


Fig. 20 Esquema de la configuración del soporte para direccionar los flujos de CO<sub>2</sub> y MQL

$$Q = A * v$$

Donde:

$Q$  = caudal (m<sup>3</sup>/s)

$A$  = área (m<sup>2</sup>)

$v$  = velocidad (m/s)

$$Q = \left( \frac{\pi D^2}{4} \right) * v$$

$$Q = \left( \frac{\pi (1.5E - 3)^2}{4} \right) * 400$$

$$Q = 7,07 E - 4 \frac{m^3}{s}$$

El sistema trabaja con dos cilindros de CO<sub>2</sub> uno en fase gaseosa y el otro en fase líquida que en un sistema de arreglo de tuberías se combina y se direcciona a la zona de corte mediante la boquilla y el soporte presentados en la figura 20. La presión en los cilindros es de 60 bar, a la salida del sistema la presión se expande a 1 atm; mientras que en el sistema de tuberías que contiene la mezcla de las dos fases de CO<sub>2</sub> opera a 10 bar.

El sistema MQL opera con una corriente de aire comprimido proporcionada a 2 bar y aceite que se expulsa a 480 ml/h como se muestra en la figura 21; en este trabajo propuesto se presenta como opción de lubricante la utilización del nano fluido que se compone de aceite Unist Coolube 2210EP, lauril sulfato de sodio y nano partículas de  $\text{TiO}_2$  homogenizadas con un mezclador magnético como se muestra en la figura 22.



Fig. 21 Configuración del Sistema de lubricación MQL

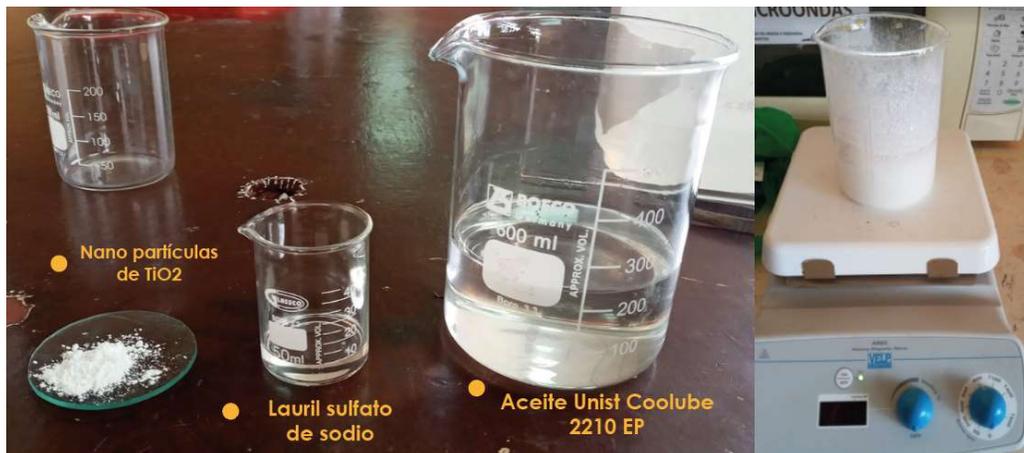
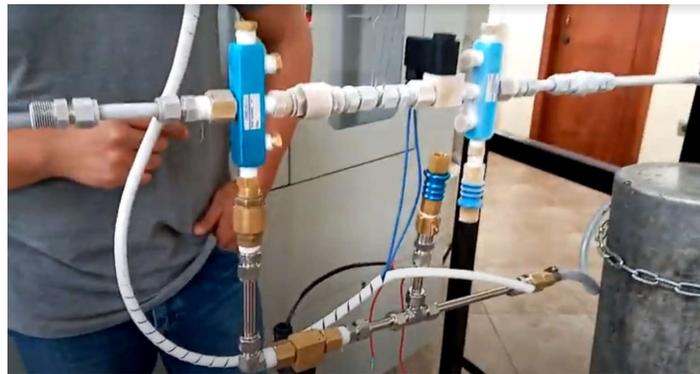


Fig. 22 Composición del nano fluido

### 3.1.2. Armario “plug and play” de lubricación pulverizada MQL con nano fluido y fluido criogénico

La creación del armario se compone de la mejora del sistema de distribución de  $\text{CO}_2$  que plantearon [20] anteriormente en los laboratorios de la facultad como se muestra

en la figura 22, con la finalidad de distribuir las tuberías y que exista una disminución de elementos que le restan la eficiencia al sistema criogénico puesto que todavía se sigue implementando mejoras de manera progresiva hasta encontrar el punto óptimo de operación del sistema. En la figura 23 se observa la utilización de bloques de distribución que tienen espacios sin utilizarse, en la línea de flujo de CO<sub>2</sub> líquido se encuentran estos bloques con hielo incluso en las áreas en donde no existen conexiones, esto provoca que se acumule de hielo en los espacios vacíos y de esta manera se obstruye el flujo continuo de CO<sub>2</sub> en el sistema.



*Fig. 23 Sistema de distribución de fluido criogénico inicial [20]*

Otro aspecto muy importante a considerarse es que la electroválvula empleada para la línea de flujo de CO<sub>2</sub> líquido no es la apropiada para los rangos de temperatura de trabajo, y esto en los ensayos presentó una dificultad debido a que existían intervalos de trabajo continuo, pero posteriormente se volvieron intermitentes, por lo que fue necesario hacer un cambio por una electroválvula más robusta que soporte este tipo de fluido que bajo las condiciones de temperatura empleadas es muy agresivo.

Se ubicó el circuito de distribución mejorado en un armario con la finalidad de mantener los componentes fijos y fuera del alcance o manipulación inadecuada hasta verificar completamente el funcionamiento del sistema. En la figura 24 se muestra los cambios implementados y ubicados en un armario de distribución.



*Fig. 24 Cambios en el circuito de mezcla y ubicación en el armario*

A pesar de los cambios y mejoras empleadas en el sistema de mezcla de CO<sub>2</sub> se evidenció que incluso utilizando una válvula más robusta existe un problema de fugas del fluido criogénico debido a que el material del empaque se reduce por la mínima temperatura que rige en ese tramo de la tubería lo cual permite la salida del CO<sub>2</sub> por sus alrededores; en vista de este problema, se sustituyó esta electroválvula que permitía el control del paso del flujo en ese punto para brindarle un flujo continuo sin apertura o cierre; la electroválvula de la línea de flujo de gas se mantuvo sin modificaciones para permitir el cierre o apertura de salida del gas.

De este modo, el armario “plug and play” de lubricación pulverizada MQL con nano fluido y fluido criogénico está listo para la conexión y utilización como se muestra en la figura 25 que consta del circuito de mezcla y distribución de CO<sub>2</sub>, la tubería de direccionamiento del fluido criogénico hacia la zona de mecanizado en el torno, el sistema MQL y las conexiones para los cilindros de CO<sub>2</sub> tanto gaseoso como líquido.



Fig. 25 Armario "plug and play" de lubricación pulverizada MQL con nano fluido y fluido criogénico

Con el sistema ensamblado y verificado el correcto funcionamiento, se pasó a los ensayos en las probetas para el mecanizado de tubería API L80. Como se muestra en la figura 26, se produce una nube de lubricación y enfriamiento dirigida a la zona de corte conformada por el fluido criogénico y nano fluido MQL.



Fig. 26 Funcionamiento del sistema de distribución del fluido criogénico junto con el nano fluido MQL

### 3.1.3. Adquisición de datos de los ensayos de rugosidad

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019				
RUGOSIDAD SUPERFICIAL						
Datos Generales						
Tipo de estudio	Experimental	Número	Experimento 1			
Fecha de ejecución	8/12/2020					
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM					
Elaborado por	Diego Arias Soto	Revisado por	Ing. Diego Núñez			
Parámetros del proceso de torneado						
Material:	API L80					
Sistema de lubricación:	Inundación					
Fluido lubricante:	Taladrina					
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025					
Tipo de operación:	Acabado					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)			
700 - 195	70 - 0,1	0,4	0,8			
Caudal lubricante (L/min)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2 (bar)	Ángulo de incidencia de CO2	Diámetro de la salida de CO2 (mm)		
3,5	N/A	N/A	N/A	N/A		
Parámetros de medición superficial						
Rugosímetro	Norma	Longitud de muestreo	Longitud de cutt of	Mediciones		
Mitutoyo SJ 210	ISO 4287	0,8 mm	2,5 μm	5		
Ra						
Probeta	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)
1	1,099	1,086	1,068	1,128	1,457	1,1676
Rz						
Probeta	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)
1	5,646	6,009	5,42	5,834	6,983	5,9784
Resultados						
			<p><b>Estado Superficial</b> Acabado fino con marcas perceptibles al tacto y poco visibles; sin embargo el acabado es uniforme.</p> <p><b>Clase de rugosidad</b> N7</p> <p><b>Proceso</b> Torneado.</p>			



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA



MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019

RUGOSIDAD SUPERFICIAL

Datos Generales

Tipo de estudio	Experimental	Número	Experimento 2
Fecha de ejecución	8/12/2020		
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM		
Elaborado por	Diego Arias Soto	Revisado por	Ing. Diego Núñez

Parámetros del proceso de torneado

Material:	API L80			
Sistema de lubricación:	Inundación			
Fluido lubricante:	Taladrina			
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025			
Tipo de operación:	Acabado			
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	
840 - 235	84 - 0,1	0,4	0,8	
Caudal lubricante (L/min)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2 (bar)	Ángulo de incidencia de CO2	Diámetro de la salida de CO2 (mm)
3,5	N/A	N/A	N/A	N/A

Parámetros de medición superficial

Rugosímetro	Norma	Longitud de muestreo	Longitud de cutt of	Mediciones		
Mitutoyo SJ 210	ISO 4287	0,8 mm	2,5 μm	5		

Ra

Probeta	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)
2	1,479	1,46	1,448	1,461	1,462	1,462

Rz

Probeta	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)
2	6,094	6,882	6,46	6,594	7,019	6,6098

Resultados



**Estado Superficial**

Acabado fino con marcas perceptibles al tacto y poco visibles; sin embargo el acabado es uniforme.

**Clase de rugosidad**

N7

**Proceso**

Torneado.



RUGOSIDAD SUPERFICIAL

Datos Generales

Tipo de estudio	Experimental	Número	Experimento 3
Fecha de ejecución	8/12/2020		
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM		
Elaborado por	Diego Arias Soto	Revisado por	Ing. Diego Núñez

Parámetros del proceso de torneado

Material:	API L80			
Sistema de lubricación:	Inundación			
Fluido lubricante:	Taladrina			
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025			
Tipo de operación:	Acabado			
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	
700 - 195	140 - 0,2	0,4	0,8	
Caudal lubricante (L/min)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2 (bar)	Ángulo de incidencia de CO2	Diámetro de la salida de CO2 (mm)
3,5	N/A	N/A	N/A	N/A

Parámetros de medición superficial

Rugosímetro	Norma	Longitud de muestreo	Longitud de cutt of	Mediciones	
Mitutoyo SJ 210	ISO 4287	0,8 mm	2,5 $\mu$ m	5	

Ra

Probeta	Med. 1 ( $\mu$ m)	Med. 2 ( $\mu$ m)	Med. 3 ( $\mu$ m)	Med. 4 ( $\mu$ m)	Med. 5 ( $\mu$ m)	Promedio ( $\mu$ m)
3	1,76	1,577	1,546	1,647	1,502	<b>1,6064</b>

Rz

Probeta	Med. 1 ( $\mu$ m)	Med. 2 ( $\mu$ m)	Med. 3 ( $\mu$ m)	Med. 4 ( $\mu$ m)	Med. 5 ( $\mu$ m)	Promedio ( $\mu$ m)
3	8,999	7,879	7,401	7,954	7,213	<b>7,8892</b>

Resultados



**Estado Superficial**

Acabado fino con marcas perceptibles al tacto y poco visibles; sin embargo el acabado es uniforme.

**Clase de rugosidad**

N7

**Proceso**

Torneado.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA



MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019

RUGOSIDAD SUPERFICIAL

Datos Generales

Tipo de estudio	Experimental	Número	Experimento 4
Fecha de ejecución	8/12/2020		
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM		
Elaborado por	Diego Arias Soto	Revisado por	Ing. Diego Núñez

Parámetros del proceso de torneado

Material:	API L80			
Sistema de lubricación:	Inundación			
Fluido lubricante:	Taladrina			
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025			
Tipo de operación:	Acabado			
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	
840 - 235	170 - 0,2	0,4	0,8	
Caudal lubricante (L/min)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2 (bar)	Ángulo de incidencia de CO2	Diámetro de la salida de CO2 (mm)
3,5	N/A	N/A	N/A	N/A

Parámetros de medición superficial

Rugosímetro	Norma	Longitud de muestreo	Longitud de cutt of	Mediciones
Mitutoyo SJ 210	ISO 4287	0,8 mm	2,5 μm	5

Ra

Probeta	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)
4	2,198	1,918	1,948	2,066	2,052	<b>2,0364</b>

Rz

Probeta	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)
4	10,598	8,994	9,057	9,764	9,664	<b>9,6154</b>

Resultados



**Estado Superficial**

Acabado fino con marcas perceptibles al tacto y poco visibles; sin embargo el acabado es uniforme.

**Clase de rugosidad**

N7

**Proceso**

Torneado.



RUGOSIDAD SUPERFICIAL

Datos Generales

Tipo de estudio	Experimental	Número	Experimento 5
Fecha de ejecución	17/12/2020		
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM		
Elaborado por	Diego Arias Soto	Revisado por	Ing. Diego Núñez

Parámetros del proceso de torneado

Material:	API L80			
Sistema de lubricación:	Lubricación híbrida con nanofluido y fluido criogénico			
Fluido lubricante:	Aceite biodegradable Unist Coolube 2210 EP - CO2			
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025			
Tipo de operación:	Acabado			
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	
700 - 195	70 - 0,1	0,4	0,8	
Caudal lubricante (mL/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2 (bar)	Ángulo de incidencia de CO2	Diámetro de la salida de CO2 (mm)
480	2	10	45°	1.5

Parámetros de medición superficial

Rugosímetro	Norma	Longitud de muestreo	Longitud de cutt of	Mediciones
Mitutoyo SJ 210	ISO 4287	0,8 mm	2,5 µm	5

Ra

Probeta	Med. 1 (µm)	Med. 2 (µm)	Med. 3 (µm)	Med. 4 (µm)	Med. 5 (µm)	Promedio (µm)
5	0,383	0,417	0,429	0,424	0,412	<b>0,413</b>

Rz

Probeta	Med. 1 (µm)	Med. 2 (µm)	Med. 3 (µm)	Med. 4 (µm)	Med. 5 (µm)	Promedio (µm)
5	2,401	2,482	2,54	2,502	2,364	<b>2,4578</b>

Resultados



**Estado Superficial**

Es un acabado muy fino con marcas no visibles ni perceptibles al tacto.

**Clase de rugosidad**

N5

**Proceso**

Torneado.



RUGOSIDAD SUPERFICIAL

Datos Generales

Tipo de estudio	Experimental	Número	Experimento 6
Fecha de ejecución	17/12/2020		
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM		
Elaborado por	Diego Arias Soto	Revisado por	Ing. Diego Núñez

Parámetros del proceso de torneado

Material:	API L80		
Sistema de lubricación:	Lubricación híbrida con nanofluido y fluido criogénico		
Fluido lubricante:	Aceite biodegradable Unist Coolube 2210 EP - CO2		
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025		
Tipo de operación:	Acabado		
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)
840 - 235	84 - 0,1	0,4	0,8
Caudal lubricante (mL/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2 (bar)	Ángulo de incidencia de CO2
480	2	10	45°
			Diámetro de la salida de CO2 (mm)
			1.5

Parámetros de medición superficial

Rugosímetro	Norma	Longitud de muestreo	Longitud de cutt of	Mediciones
Mitutoyo SJ 210	ISO 4287	0,8 mm	2,5 $\mu\text{m}$	5

Ra

Probeta	Med. 1 ( $\mu\text{m}$ )	Med. 2 ( $\mu\text{m}$ )	Med. 3 ( $\mu\text{m}$ )	Med. 4 ( $\mu\text{m}$ )	Med. 5 ( $\mu\text{m}$ )	Promedio ( $\mu\text{m}$ )
6	0,939	0,909	0,884	0,913	0,892	<b>0,9074</b>

Rz

Probeta	Med. 1 ( $\mu\text{m}$ )	Med. 2 ( $\mu\text{m}$ )	Med. 3 ( $\mu\text{m}$ )	Med. 4 ( $\mu\text{m}$ )	Med. 5 ( $\mu\text{m}$ )	Promedio ( $\mu\text{m}$ )
6	4,837	4,348	4,352	4,129	4,212	<b>4,3756</b>

Resultados



**Estado Superficial**

Es un acabado muy fino con marcas no visibles ni perceptibles al tacto.

**Clase de rugosidad**

N6

**Proceso**

Torneado.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019



RUGOSIDAD SUPERFICIAL

Datos Generales

Tipo de estudio	Experimental	Número	Experimento 7
Fecha de ejecución	17/12/2020		
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM		
Elaborado por	Diego Arias Soto	Revisado por	Ing. Diego Núñez

Parámetros del proceso de torneado

Material:	API L80		
Sistema de lubricación:	Lubricación híbrida con nanofluido y fluido criogénico		
Fluido lubricante:	Aceite biodegradable Unist Coolube 2210 EP - CO2		
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025		
Tipo de operación:	Acabado		
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)
700 - 195	140 - 0,2	0,4	0,8
Caudal lubricante (mL/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2 (bar)	Ángulo de incidencia de CO2
480	2	10	45°
			Diámetro de la salida de CO2 (mm)
			1.5

Parámetros de medición superficial

Rugosímetro	Norma	Longitud de muestreo	Longitud de cutt of	Mediciones
Mitutoyo SJ 210	ISO 4287	0,8 mm	2,5 μm	5

Ra

Probeta	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)
7	1,427	1,596	1,544	1,54	1,557	<b>1,5328</b>

Rz

Probeta	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)
7	7,67	8,796	7,679	7,501	8,14	<b>7,9572</b>

Resultados



**Estado Superficial**

Acabado fino con marcas perceptibles al tacto y poco visibles; sin embargo el acabado es uniforme.

**Clase de rugosidad**

N7

**Proceso**

Torneado.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019



RUGOSIDAD SUPERFICIAL

Datos Generales

Tipo de estudio	Experimental	Número	Experimento 8
Fecha de ejecución	17/12/2020		
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM		
Elaborado por	Diego Arias Soto	Revisado por	Ing. Diego Núñez

Parámetros del proceso de torneado

Material:	API L80		
Sistema de lubricación:	Lubricación híbrida con nanofluido y fluido criogénico		
Fluido lubricante:	Aceite biodegradable Unist Coolube 2210 EP - CO2		
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025		
Tipo de operación:	Acabado		
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)
840 - 235	170 - 0,2	0,4	0,8
Caudal lubricante (mL/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2 (bar)	Ángulo de incidencia de CO2
480	2	10	45°
			Diámetro de la salida de CO2 (mm)
			1.5

Parámetros de medición superficial

Rugosímetro	Norma	Longitud de muestreo	Longitud de cutt of	Mediciones
Mitutoyo SJ 210	ISO 4287	0,8 mm	2,5 μm	5

Ra

Probeta	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)
8	1,449	1,806	1,398	1,491	1,577	<b>1,5442</b>

Rz

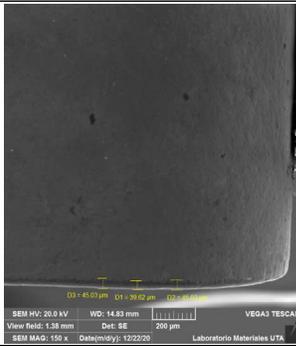
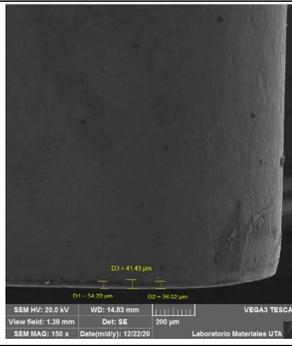
Probeta	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)
8	7,056	8,618	6,972	7,083	7,637	<b>7,4732</b>

Resultados

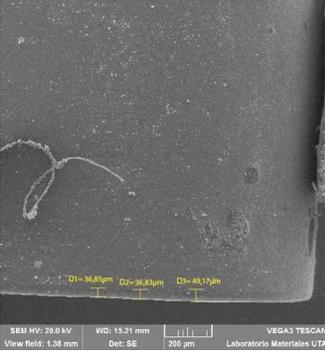
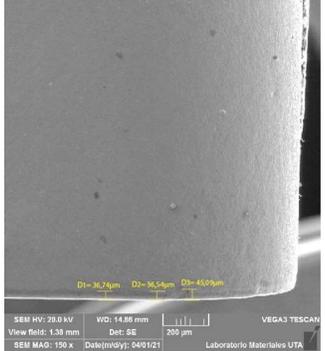
	<p><b>Estado Superficial</b> Acabado fino con marcas perceptibles al tacto y poco visibles; sin embargo el acabado es uniforme.</p> <p><b>Clase de rugosidad</b> N7</p> <p><b>Proceso</b> Torneado.</p>
---	---

### 3.1.4. Adquisición de datos de los ensayos de evaluación del desgaste de la herramienta de corte.

Evaluación del criterio de desgaste a los 5 min de mecanizado bajo las condiciones de corte de 195 m/min y 0,1 mm/rev usando el método de inundación y nano fluido y fluido criogénico.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019			
REPORTE DE EVALUACIÓN DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Generales					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		Experimento 1 y 5	
Fecha de ejecución			8/12/2020		
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Diego Arias Soto	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)		Tiempo de mecanizado (min)
700 - 195	70 - 0,1	0,4	0,8		5
Material:	API L80		Material:	API L80	
Sistema de lubricación:	Inundación		Sistema de lubricación:	Lubricación con nanofluido y fluido criogénico	
Fluido lubricante:	Taladrina		Fluido lubricante:	Aceite biodegradable Unist Coolube 2210 EP - CO2 - Nano TiO2	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025		Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025	
Tipo de operación:	Acabado		Tipo de operación:	Acabado	
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Ángulo de incidencia de CO2	Diámetro de la salida de CO2	
480	2	60	45°	1.5	
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
INUNDACIÓN			NANO FLUIDO Y FLUIDO CRIOGÉNICO		
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 45,03 um <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 43,23 um			<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 41,43 um <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 37,22 um		
<b>Análisis:</b> En los insertos utilizados para el torneado de API L80 utilizando los dos distintos métodos de lubricación se observa que aún no se ha llegado a cumplir con el criterio de desgaste establecido por la norma ISO 3685 VBmáx: 600 um y en desgaste regular como es en este caso, de VB: 300 um.					
<b>Observación:</b> Se observa un desgaste similar en los dos métodos de lubricación planteados, sin embargo, utilizando nano fluido y fluido criogénico se observa ligeramente un menor desgaste. No se observa adhesión de material y es un desgaste uniforme.					

Evaluación del criterio de desgaste a los 5 min de mecanizado bajo las condiciones de corte de 235 m/min y 0,1 mm/rev usando el método de inundación y nano fluido y fluido criogénico.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019	
 					
<b>REPORTE DE EVALUACIÓN DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA</b>					
<b>Datos Generales</b>					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem	Experimento 2 y 6		
Fecha de ejecución		8/12/2020			
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Diego Arias Soto	Revisado por	Ing. Diego Núñez		
<b>Parámetros de torneado y lubricación</b>					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Tiempo de mecanizado (min)	
840 - 235	84 - 0,1	0,4	0,8	5	
Material:	API L80		Material:	API L80	
Sistema de lubricación:	Inundación		Sistema de lubricación:	Lubricación con nanofluido y fluido criogénico	
Fluido lubricante:	Taladrina		Fluido lubricante:	Aceite biodegradable Unist Coolube 2210 EP - CO2 - Nano TiO2	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025		Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025	
Tipo de operación:	Acabado		Tipo de operación:	Acabado	
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Ángulo de incidencia de CO2	Diámetro de la salida de CO2	
480	2	60	45°	1.5	
<b>REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL</b>					
<b>INUNDACIÓN</b>			<b>NANO FLUIDO Y FLUIDO CRIOGÉNICO</b>		
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 49,17 µm <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 40,95 µm			<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 45,09 µm <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 39,46 µm		
<b>Análisis:</b> En los insertos utilizados para el torneado de API L80 utilizando los dos distintos métodos de lubricación se observa que aún no se ha llegado a cumplir con el criterio de desgaste establecido por la norma ISO 3685 VBmáx: 600 µm y en desgaste regular como es en este caso, de VB: 300 µm.					
<b>Observación:</b> El desgaste es regular en los dos casos; en las condiciones de corte empleadas para los dos métodos de lubricación y enfriamiento se puede evidenciar que usando nanofluido y fluido criogénico el desgaste es ligeramente inferior comparado con el método de inundación.					

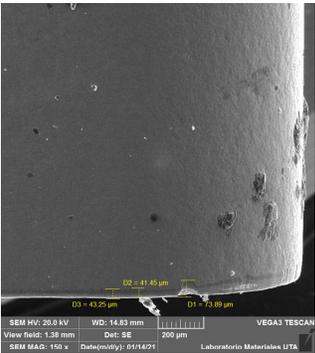
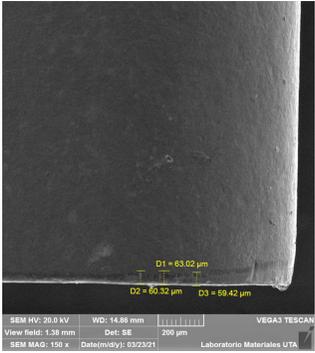
Evaluación del criterio de desgaste a los 5 min de mecanizado bajo las condiciones de corte de 195 m/min y 0,2 mm/rev usando el método de inundación y nano fluido y fluido criogénico.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019	
<b>REPORTE DE EVALUACIÓN DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA</b>					
<b>Datos Generales</b>					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		Experimento 3 y 7	
Fecha de ejecución			8/12/2020		
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Diego Arias Soto	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
<b>Parámetros de torneado y lubricación</b>					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Tiempo de mecanizado (min)	
700 - 195	140 - 0,2	0,4	0,8	5	
Material:	API L80		Material:	API L80	
Sistema de lubricación:	Inundación		Sistema de lubricación:	Lubricación con nanofluido y fluido criogénico	
Fluido lubricante:	Taladrina		Fluido lubricante:	Aceite biodegradable Unist Coolube 2210 EP - CO2 - Nano TiO2	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025		Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025	
Tipo de operación:	Acabado		Tipo de operación:	Acabado	
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Ángulo de incidencia de CO2	Diámetro de la salida de CO2	
480	2	60	45°	1.5	
<b>REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL</b>					
<b>INUNDACIÓN</b>			<b>NANO FLUIDO Y FLUIDO CRIOGÉNICO</b>		
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 43,17 µm <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 42,02 µm			<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 40,91 µm <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 36,39 µm		
<b>Análisis:</b> En los insertos utilizados para el torneado de API L80 utilizando los dos distintos métodos de lubricación se observa que aún no se ha llegado a cumplir con el criterio de desgaste establecido por la norma ISO 3685 VBmáx: 600 µm y en desgaste regular como es en este caso, de VB: 300 µm.					
<b>Observación:</b> Se evidencia un desgaste regular en los dos métodos de lubricación planteados, sin embargo, utilizando el método de nano fluido y fluido criogénico se tiene un desgaste menor en VB; además en este último se presenta una ligera adhesión de material.					

Evaluación del criterio de desgaste a los 5 min de mecanizado bajo las condiciones de corte de 235 m/min y 0,2 mm/rev usando el método de inundación y nano fluido y fluido criogénico.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019	
<b>REPORTE DE EVALUACIÓN DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA</b>					
<b>Datos Generales</b>					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		Experimento 4 y 8	
Fecha de ejecución			8/12/2020		
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Diego Arias Soto	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
<b>Parámetros de torneado y lubricación</b>					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)		Tiempo de mecanizado (min)
840 - 235	170 - 0,2	0,4	0,8		5
Material:	API L80		Material:	API L80	
Sistema de lubricación:	Inundación		Sistema de lubricación:	Lubricación con nanofluido y fluido criogénico	
Fluido lubricante:	Taladrina		Fluido lubricante:	Aceite biodegradable Unist Coolube 2210 EP - CO2 - Nano TiO2	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025		Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025	
Tipo de operación:	Acabado		Tipo de operación:	Acabado	
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Ángulo de incidencia de CO2	Diámetro de la salida de CO2	
480	2	60	45°	1.5	
<b>REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL</b>					
<b>INUNDACIÓN</b>			<b>NANO FLUIDO Y FLUIDO CRIOGÉNICO</b>		
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 48,77 um <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 41,31 um			<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 42,98 um <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 39,61 um		
<b>Análisis:</b> En los insertos utilizados para el torneado de API L80 utilizando los dos distintos métodos de lubricación se observa que aún no se ha llegado a cumplir con el criterio de desgaste establecido por la norma ISO 3685 VBmáx: 600 um y en desgaste regular como es en este caso, de VB: 300 um.					
<b>Observación:</b> Se evidencia un desgaste regular en los dos métodos de lubricación planteados, sin embargo, utilizando el método de nano fluido y fluido criogénico se tiene un desgaste menor en VB; además en la fotografía de este último se observa un elemento ajeno al inserto, que corresponde a la etiqueta de identificación del número de inserto que no se ha removido antes de la observación mediante el microscopio SEM.					

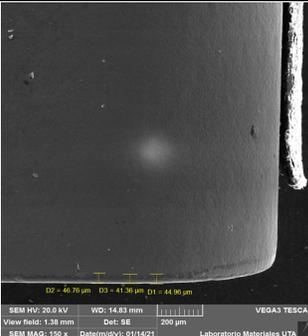
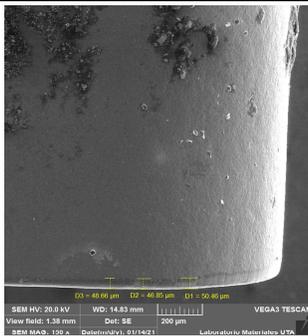
Evaluación del criterio de desgaste a los 20 min de mecanizado bajo las condiciones de corte de 195 m/min y 0,1 mm/rev usando el método de inundación y nano fluido y fluido criogénico.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019			
REPORTE DE EVALUACIÓN DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Generales					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		Experimento 1 y 5	
Fecha de ejecución			14/1/2021		
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Diego Arias Soto	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)		Tiempo de mecanizado (min)
700 - 195	70 - 0,1	0,4	0,8		20
Material:	API L80		Material:	API L80	
Sistema de lubricación:	Inundación		Sistema de lubricación:	Lubricación con nanofluido y fluido criogénico	
Fluido lubricante:	Taladrina		Fluido lubricante:	Aceite biodegradable Unist Coolube 2210 EP - CO2 - Nano TiO2	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025		Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025	
Tipo de operación:	Acabado		Tipo de operación:	Acabado	
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Ángulo de incidencia de CO2	Diámetro de la salida de CO2	
480	2	60	45°	1,5	
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
INUNDACIÓN			NANO FLUIDO Y FLUIDO CRIOGÉNICO		
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 73,89 um <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 52,86 um			<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 63,02 um <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 60,92 um		
<b>Análisis:</b> En los insertos utilizados para el torneado de API L80 utilizando los dos distintos métodos de lubricación se observa que aún no se ha llegado a cumplir con el criterio de desgaste establecido por la norma ISO 3685 VBmáx: 600 um y en desgaste regular como es en este caso, de VB: 300 um.					
<b>Observación:</b> En el método de inundación se observa desgaste uniforme y un ligero desprendimiento de material del flanco del inserto, a su vez, el desgaste máximo VBb máx es superior al caso de lubricación de nano fluido y fluido criogénico, sin embargo, en este segundo caso de lubricación el VB (promedio) es superior y de igual manera se evidencia un desgaste uniforme.					

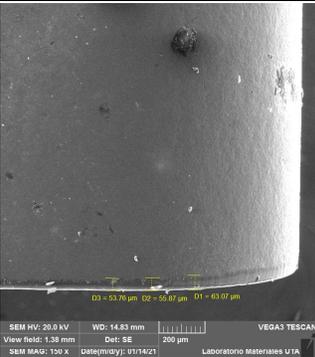
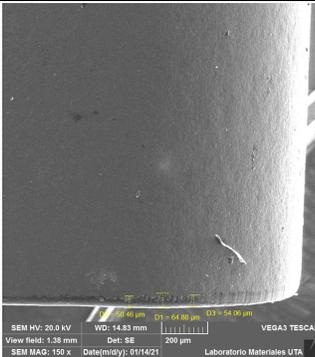
Evaluación del criterio de desgaste a los 20 min de mecanizado bajo las condiciones de corte de 235 m/min y 0,1 mm/rev usando el método de inundación y nano fluido y fluido criogénico.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019	
REPORTE DE EVALUACIÓN DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Generales					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		Experimento 2 y 6	
Fecha de ejecución			8/12/2020		
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Diego Arias Soto	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)		Tiempo de mecanizado (min)
840 - 235	84 - 0,1	0,4	0,8		20
Material:	API L80		Material:	API L80	
Sistema de lubricación:	Inundación		Sistema de lubricación:	Lubricación con nanofluido y fluido criogénico	
Fluido lubricante:	Taladrina		Fluido lubricante:	Aceite biodegradable Unist Coolube 2210 EP - CO2 - Nano TiO2	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025		Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025	
Tipo de operación:	Acabado		Tipo de operación:	Acabado	
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Ángulo de incidencia de CO2	Diámetro de la salida de CO2	
480	2	60	45°	1.5	
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
INUNDACIÓN			NANO FLUIDO Y FLUIDO CRIOGÉNICO		
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 53,24 µm <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 48,26 µm			<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 51,95 µm <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 45,51 µm		
<b>Análisis:</b> En los insertos utilizados para el torneado de API L80 utilizando los dos distintos métodos de lubricación se observa que aún no se ha llegado a cumplir con el criterio de desgaste establecido por la norma ISO 3685 VBmáx: 600 µm y en desgaste regular como es en este caso, de VB: 300 µm.					
<b>Observación:</b> Es desgaste es regular en los dos casos, sin embargo, en el método de lubricación y enfriamiento con nano fluido y fluido criogénico el desgaste es inferior. Por otro lado, en el caso del inserto en donde se empleó el método de refrigeración y lubricación por inundación se observa adhesión del material mecanizado.					

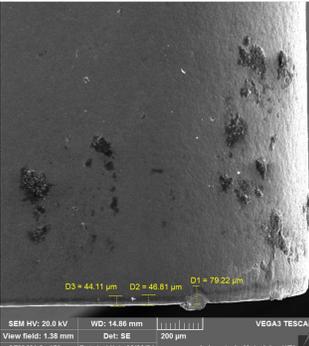
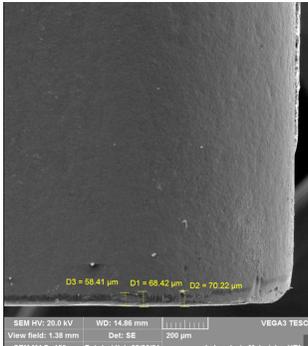
Evaluación del criterio de desgaste a los 20 min de mecanizado bajo las condiciones de corte de 195 m/min y 0,2 mm/rev usando el método de inundación y nano fluido y fluido criogénico.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019	
 					
<b>REPORTE DE EVALUACIÓN DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA</b>					
Datos Generales					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		Experimento 3 y 7	
Fecha de ejecución			8/12/2020		
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Diego Arias Soto	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)		Tiempo de mecanizado (min)
700 - 195	140 - 0,2	0,4	0,8		20
Material:	API L80		Material:	API L80	
Sistema de lubricación:	Inundación		Sistema de lubricación:	Lubricación con nanofluido y fluido criogénico	
Fluido lubricante:	Taladrina		Fluido lubricante:	Aceite biodegradable Unist Coolube 2210 EP - CO2 - Nano TiO2	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025		Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025	
Tipo de operación:	Acabado		Tipo de operación:	Acabado	
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Ángulo de incidencia de CO2	Diámetro de la salida de CO2	
480	2	60	45°	1.5	
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
INUNDACIÓN			NANO FLUIDO Y FLUIDO CRIOGÉNICO		
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 46,76 um <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 44,36 um			<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 50,46 um <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 48,66 um		
<b>Análisis:</b> En los insertos utilizados para el torneado de API L80 utilizando los dos distintos métodos de lubricación se observa que aún no se ha llegado a cumplir con el criterio de desgaste establecido por la norma ISO 3685 VBmáx: 600 um y en desgaste regular como es en este caso, de VB: 300 um.					
<b>Observación:</b> Se evidencia un desgaste regular en los dos métodos de lubricación planteados, sin embargo, utilizando el método de inundación se tiene un desgaste menor en VB; y en el otro método se aprecia adhesión de material. En el inserto empleado para el método de inundación se observa parte del adhesivo ubicado para identificar la numeración del experimento.					

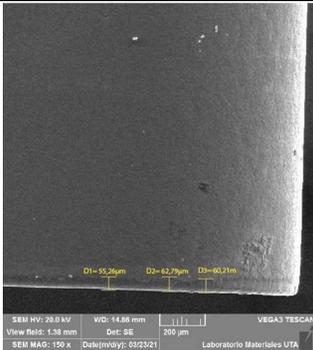
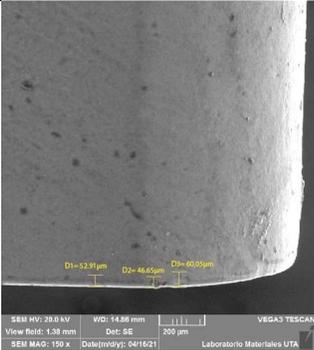
Evaluación del criterio de desgaste a los 20 min de mecanizado bajo las condiciones de corte de 235 m/min y 0,2 mm/rev usando el método de inundación y nano fluido y fluido criogénico.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019			
REPORTE DE EVALUACIÓN DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Generales					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		Experimento 4 y 8	
Fecha de ejecución			8/12/2020		
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Diego Arias Soto	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Tiempo de mecanizado (min)	
840 - 235	170 - 0,2	0,4	0,8	20	
Material:	API L80		Material:	API L80	
Sistema de lubricación:	Inundación		Sistema de lubricación:	Lubricación con nanofluido y fluido criogénico	
Fluido lubricante:	Taladrina		Fluido lubricante:	Aceite biodegradable Unist Coolube 2210 EP - CO2 - Nano TiO2	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025		Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025	
Tipo de operación:	Acabado		Tipo de operación:	Acabado	
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Ángulo de incidencia de CO2	Diámetro de la salida de CO2	
480	2	60	45°	1.5	
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
INUNDACIÓN			NANO FLUIDO Y FLUIDO CRIOGÉNICO		
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 53,76 um <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 57,57 um			<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 64,88 um <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 56,47 um		
<b>Análisis:</b> En los insertos utilizados para el torneado de API L80 utilizando los dos distintos métodos de lubricación se observa que aún no se ha llegado a cumplir con el criterio de desgaste establecido por la norma ISO 3685 VBmáx: 600 um y en desgaste regular como es en este caso, de VB: 300 um.					
<b>Observación:</b> Se evidencia un desgaste regular en los dos métodos de lubricación planteados, sin embargo, utilizando el método de nano fluido y fluido criogénico se tiene un desgaste ligeramente menor en VB.					

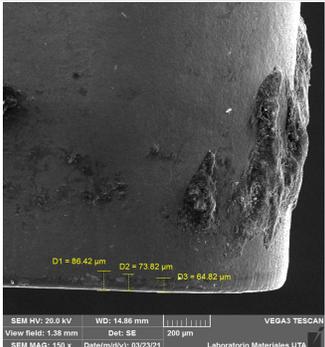
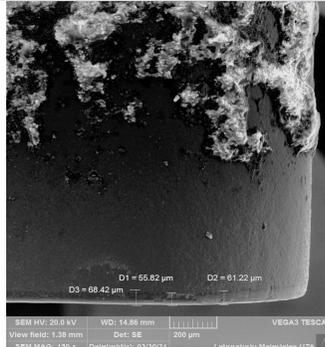
Evaluación del criterio de desgaste a los 40 min de mecanizado bajo las condiciones de corte de 195 m/min y 0,1 mm/rev usando el método de inundación y nano fluido y fluido criogénico.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019	
 					
<b>REPORTE DE EVALUACIÓN DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA</b>					
Datos Generales					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		Experimento 1 y 5	
Fecha de ejecución			14/1/2021		
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Diego Arias Soto	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)		Tiempo de mecanizado (min)
700 - 195	70 - 0,1	0,4	0,8		40
Material:	API L80		Material:	API L80	
Sistema de lubricación:	Inundación		Sistema de lubricación:	Lubricación con nanofluido y fluido criogénico	
Fluido lubricante:	Taladrina		Fluido lubricante:	Aceite biodegradable Unist Coolube 2210 EP - CO2 - Nano TiO2	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025		Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025	
Tipo de operación:	Acabado		Tipo de operación:	Acabado	
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Ángulo de incidencia de CO2	Diámetro de la salida de CO2	
480	2	60	45°	1.5	
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
INUNDACIÓN			NANO FLUIDO Y FLUIDO CRIOGÉNICO		
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 79,22 um <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 56,71 um			<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 70,22 um <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 65,68 um		
<b>Análisis:</b> En los insertos utilizados para el torneado de API L80 utilizando los dos distintos métodos de lubricación se observa que aún no se ha llegado a cumplir con el criterio de desgaste establecido por la norma ISO 3685 VBmáx: 600 um y en desgaste regular como es en este caso, de VB: 300 um.					
<b>Observación:</b> En el método de inundación se observa desgaste uniforme y un ligero desprendimiento de material del flanco del inserto y un aumento en la adhesión del material mecanizado; por otro lado, el desgaste VB (promedio) es mayor en el caso de lubricación y enfriamiento con nano fluido y fluido criogénico.					

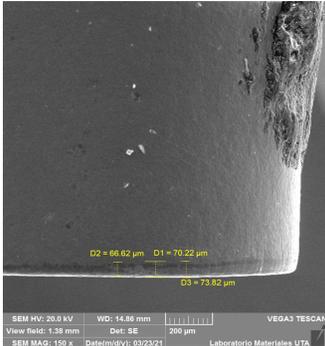
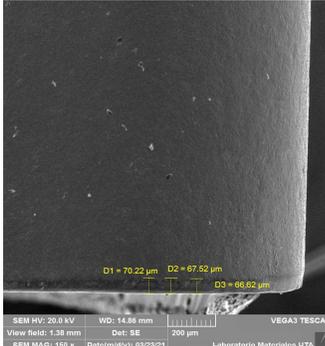
Evaluación del criterio de desgaste a los 40 min de mecanizado bajo las condiciones de corte de 235 m/min y 0,1 mm/rev usando el método de inundación y nano fluido y fluido criogénico.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019	
<b>REPORTE DE EVALUACIÓN DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA</b>					
<b>Datos Generales</b>					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem	Experimento 2 y 6		
Fecha de ejecución		8/12/2020			
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Diego Arias Soto	Revisado por	Ing. Diego Núñez		
<b>Parámetros de torneado y lubricación</b>					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)	Tiempo de mecanizado (min)	
840 - 235	84 - 0,1	0,4	0,8	40	
Material:	API L80		Material:	API L80	
Sistema de lubricación:	Inundación		Sistema de lubricación:	Lubricación con nanofluido y fluido criogénico	
Fluido lubricante:	Taladrina		Fluido lubricante:	Aceite biodegradable Unist Coolube 2210 EP - CO2 - Nano TiO2	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025		Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025	
Tipo de operación:	Acabado		Tipo de operación:	Acabado	
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Ángulo de incidencia de CO2	Diámetro de la salida de CO2	
480	2	60	45°	1,5	
<b>REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL</b>					
<b>INUNDACIÓN</b>			<b>NANO FLUIDO Y FLUIDO CRIOGÉNICO</b>		
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 62,79 µm <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 59,42 µm			<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 67,96 µm <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 55,84 µm		
<b>Análisis:</b> En los insertos utilizados para el torneado de API L80 utilizando los dos distintos métodos de lubricación se observa que aún no se ha llegado a cumplir con el criterio de desgaste establecido por la norma ISO 3685 VBmáx: 600 µm y en desgaste regular como es en este caso, de VB: 300 µm.					
<b>Observación:</b> Es desgaste es regular en los dos casos, sin embargo, en el método de lubricación y enfriamiento con el método de inundación el desgaste es superior.					

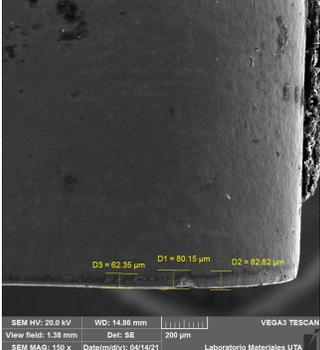
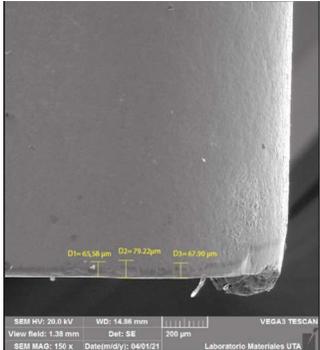
Evaluación del criterio de desgaste a los 40 min de mecanizado bajo las condiciones de corte de 195 m/min y 0,2 mm/rev usando el método de inundación y nano fluido y fluido criogénico.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019	
 					
REPORTE DE EVALUACIÓN DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Generales					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		Experimento 3 y 7	
Fecha de ejecución			8/12/2020		
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Diego Arias Soto	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)		Tiempo de mecanizado (min)
700 - 195	140 - 0,2	0,4	0,8		40
Material:	API L80		Material:	API L80	
Sistema de lubricación:	Inundación		Sistema de lubricación:	Lubricación con nanofluido y fluido criogénico	
Fluido lubricante:	Taladrina		Fluido lubricante:	Aceite biodegradable Unist Coolube 2210 EP - CO2 - Nano TiO2	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025		Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025	
Tipo de operación:	Acabado		Tipo de operación:	Acabado	
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Ángulo de incidencia de CO2	Diámetro de la salida de CO2	
480	2	60	45°	1.5	
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
INUNDACIÓN			NANO FLUIDO Y FLUIDO CRIOGÉNICO		
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 86,42 um <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 75,02 um			<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 68,42 um <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 61,82 um		
<b>Análisis:</b> En los insertos utilizados para el torneado de API L80 utilizando los dos distintos métodos de lubricación se observa que aún no se ha llegado a cumplir con el criterio de desgaste establecido por la norma ISO 3685 VBmáx: 600 um y en desgaste regular como es en este caso, de VB: 300 um.					
<b>Observación:</b> Se evidencia un desgaste regular en los dos métodos de lubricación planteados, sin embargo, utilizando el método de inundación se tiene un desgaste mayor en VB; y en los dos casos se aprecia adhesión de material abundante.					

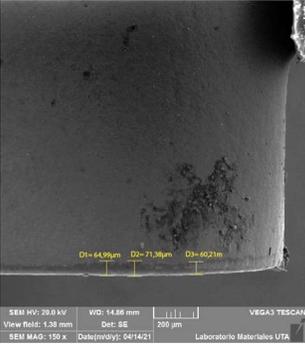
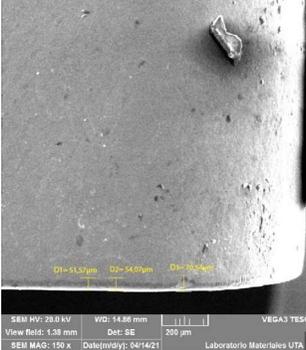
Evaluación del criterio de desgaste a los 40 min de mecanizado bajo las condiciones de corte de 235 m/min y 0,2 mm/rev usando el método de inundación y nano fluido y fluido criogénico.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019	
REPORTE DE EVALUACIÓN DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Generales					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		Experimento 4 y 8	
Fecha de ejecución			8/12/2020		
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Diego Arias Soto	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)		Tiempo de mecanizado (min)
840 - 235	170 - 0,2	0,4	0,8		40
Material:	API L80		Material:	API L80	
Sistema de lubricación:	Inundación		Sistema de lubricación:	Lubricación con nanofluido y fluido criogénico	
Fluido lubricante:	Taladrina		Fluido lubricante:	Aceite biodegradable Unist Coolube 2210 EP - CO2 - Nano TiO2	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025		Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025	
Tipo de operación:	Acabado		Tipo de operación:	Acabado	
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Ángulo de incidencia de CO2	Diámetro de la salida de CO2	
480	2	60	45°	1.5	
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
INUNDACIÓN			NANO FLUIDO Y FLUIDO CRIOGÉNICO		
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 73,82 um <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 70,22 um			<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 66,62 um <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 68,12 um		
<b>Análisis:</b> En los insertos utilizados para el torneado de API L80 utilizando los dos distintos métodos de lubricación se observa que aún no se ha llegado a cumplir con el criterio de desgaste establecido por la norma ISO 3685 VBmáx: 600 um y en desgaste regular como es en este caso, de VB: 300 um.					
<b>Observación:</b> Se evidencia un desgaste regular en los dos métodos de lubricación planteados, sin embargo, utilizando el método de nano fluido y fluido criogénico se tiene un desgaste ligeramente menor en VB.					

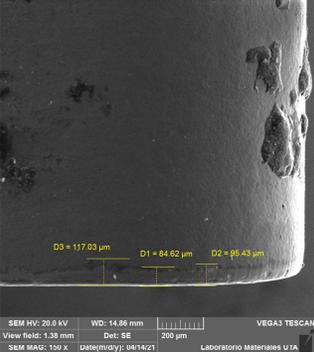
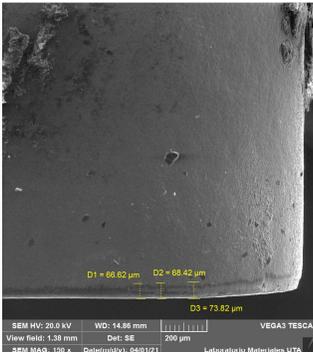
Evaluación del criterio de desgaste a los 60 min de mecanizado bajo las condiciones de corte de 195 m/min y 0,1 mm/rev usando el método de inundación y nano fluido y fluido criogénico.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019	
 					
<b>REPORTE DE EVALUACIÓN DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA</b>					
Datos Generales					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		Experimento 1 y 5	
Fecha de ejecución			14/1/2021		
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Diego Arias Soto	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)		Tiempo de mecanizado (min)
700 - 195	70 - 0,1	0,4	0,8		60
Material:	API L80		Material:	API L80	
Sistema de lubricación:	Inundación		Sistema de lubricación:	Lubricación con nanofluido y fluido criogénico	
Fluido lubricante:	Taladrina		Fluido lubricante:	Aceite biodegradable Unist Coolube 2210 EP - CO2 - Nano TiO2	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025		Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025	
Tipo de operación:	Acabado		Tipo de operación:	Acabado	
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Ángulo de incidencia de CO2	Diámetro de la salida de CO2	
480	2	60	45°	1.5	
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
INUNDACIÓN			NANO FLUIDO Y FLUIDO CRIOGÉNICO		
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 82,82 um <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 75,11 um			<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 79,22 um <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 70,9 um		
<b>Análisis:</b> En los insertos utilizados para el torneado de API L80 utilizando los dos distintos métodos de lubricación se observa que aún no se ha llegado a cumplir con el criterio de desgaste establecido por la norma ISO 3685 VBmáx: 600 um y en desgaste regular como es en este caso, de VB: 300 um.					
<b>Observación:</b> En el método de inundación se observa desgaste uniforme y un ligero desprendimiento de material del flanco del inserto; por otro lado, el desgaste VB (promedio) es mayor en el caso de lubricación y enfriamiento por inundación.					

Evaluación del criterio de desgaste a los 60 min de mecanizado bajo las condiciones de corte de 235 m/min y 0,1 mm/rev usando el método de inundación y nano fluido y fluido criogénico.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019			
REPORTE DE EVALUACIÓN DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA					
Datos Generales					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		Experimento 2 y 6	
Fecha de ejecución			8/12/2020		
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Diego Arias Soto	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)		Tiempo de mecanizado (min)
840 - 235	84 - 0,1	0,4	0,8		60
Material:	API L80		Material:	API L80	
Sistema de lubricación:	Inundación		Sistema de lubricación:	Lubricación con nanofluido y fluido criogénico	
Fluido lubricante:	Taladrina		Fluido lubricante:	Aceite biodegradable Unist Coolube 2210 EP - CO2 - Nano TiO2	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025		Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025	
Tipo de operación:	Acabado		Tipo de operación:	Acabado	
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Angulo de incidencia de CO2	Diámetro de la salida de CO2	
480	2	60	45°	1.5	
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
INUNDACIÓN			NANO FLUIDO Y FLUIDO CRIOGÉNICO		
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 71,38 µm <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 65,53 µm			<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 70,54 µm <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 58,73 µm		
<b>Análisis:</b> En los insertos utilizados para el torneado de API L80 utilizando los dos distintos métodos de lubricación se observa que aún no se ha llegado a cumplir con el criterio de desgaste establecido por la norma ISO 3685 VBmáx: 600 µm y en desgaste regular como es en este caso, de VB: 300 µm.					
<b>Observación:</b> Es desgaste es regular en los dos casos, sin embargo, en el método de lubricación y enfriamiento con el método de inundación el desgaste es superior. En los dos casos se observa adhesión de material					

Evaluación del criterio de desgaste a los 60 min de mecanizado bajo las condiciones de corte de 195 m/min y 0,2 mm/rev usando el método de inundación y nano fluido y fluido criogénico.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019	
 					
<b>REPORTE DE EVALUACIÓN DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA</b>					
Datos Generales					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem		Experimento 3 y 7	
Fecha de ejecución			8/12/2020		
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Diego Arias Soto	Revisado por		Ing. Diego Núñez	
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)		Tiempo de mecanizado (min)
700 - 195	140 - 0,2	0,4	0,8		60
Material:	API L80		Material:	API L80	
Sistema de lubricación:	Inundación		Sistema de lubricación:	Lubricación con nanofluido y fluido criogénico	
Fluido lubricante:	Taladrina		Fluido lubricante:	Aceite biodegradable Unist Coolube 2210 EP - CO2 - Nano TiO2	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025		Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025	
Tipo de operación:	Acabado		Tipo de operación:	Acabado	
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Ángulo de incidencia de CO2	Diámetro de la salida de CO2	
480	2	60	45°	1.5	
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
INUNDACIÓN			NANO FLUIDO Y FLUIDO CRIOGÉNICO		
					
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 117,03 µm <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 99,03 µm			<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 73,82 µm <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 69,62 µm		
<b>Análisis:</b> En los insertos utilizados para el torneado de API L80 utilizando los dos distintos métodos de lubricación se observa que aún no se ha llegado a cumplir con el criterio de desgaste establecido por la norma ISO 3685 VBmáx: 600 µm y en desgaste regular como es en este caso, de VB: 300 µm.					
<b>Observación:</b> Se evidencia un desgaste regular en los dos métodos de lubricación planteados; sin embargo, utilizando el método de inundación se tiene un desgaste mayor en VB; y en los dos casos se aprecia adhesión de material abundante.					

Evaluación del criterio de desgaste a los 60 min de mecanizado bajo las condiciones de corte de 235 m/min y 0,2 mm/rev usando el método de inundación y nano fluido y fluido criogénico.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019	
<b>REPORTE DE EVALUACIÓN DE DESGASTE DEL FLANCO DE LA HERRAMIENTA</b>					
Datos Generales					
Tipo de estudio	Experimental	Ítem	Experimento 4 y 8		
Fecha de ejecución		8/12/2020			
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM				
Elaborado por	Diego Arias Soto	Revisado por	Ing. Diego Núñez		
Parámetros de torneado y lubricación					
n (rpm) - Vc (m/min)	Vf (mm/min) - fn (mm/rev)	Ap (mm)	Radio de punta del inserto (mm)		Tiempo de mecanizado (min)
840 - 235	170 - 0,2	0,4	0,8		60
Material:	API L80		Material:	API L80	
Sistema de lubricación:	Inundación		Sistema de lubricación:	Lubricación con nanofluido y fluido criogénico	
Fluido lubricante:	Taladrina		Fluido lubricante:	Aceite biodegradable Unist Coolube 2210 EP - CO2 - Nano TiO2	
Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025		Herramienta de corte:	CNMG120408 MF 2025	
Tipo de operación:	Acabado		Tipo de operación:	Acabado	
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2	Ángulo de incidencia de CO2	Diámetro de la salida de CO2	
480	2	60	45°	1.5	
REGISTRO DE MEDICIÓN GENERAL					
INUNDACIÓN			NANO FLUIDO Y FLUIDO CRIOGÉNICO		
<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 89,13 um <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 83,41 um			<i>Desgaste máximo en el ancho del flanco</i> <b>VBb máx</b> 81,08 um <i>Desgaste promedio en el ancho del flanco</i> <b>VB</b> 75,68 um		
<b>Análisis:</b> En los insertos utilizados para el torneado de API L80 utilizando los dos distintos métodos de lubricación se observa que aún no se ha llegado a cumplir con el criterio de desgaste establecido por la norma ISO 3685 VBmáx: 600 um y en desgaste regular como es en este caso, de VB: 300 um.					
<b>Observación:</b> Se evidencia un desgaste regular en los dos métodos de lubricación planteados, sin embargo, utilizando el método de nano fluido y fluido criogénico se tiene un desgaste ligeramente menor en VB.					

### 3.1.5. Interpretación de resultados

#### 3.1.5.1. Rugosidad

En el caso de las mediciones de rugosidad se obtuvieron los datos recolectados de los cuales se extrae el resumen de Ra expuesto en la tabla 10 en donde se identifican los valores obtenidos mediante el Rugosímetro.

Tabla 10 Resultados obtenidos de las mediciones de rugosidad Ra

Rugosidad Ra ( $\mu\text{m}$ )			
Vc (m/min)	CryoMQL	Taladrina	Vf (mm/rev)
195	0,413	1,1676	0,1
235	0,9074	1,462	
195	1,5328	1,6064	0,2
235	1,5442	2,0364	

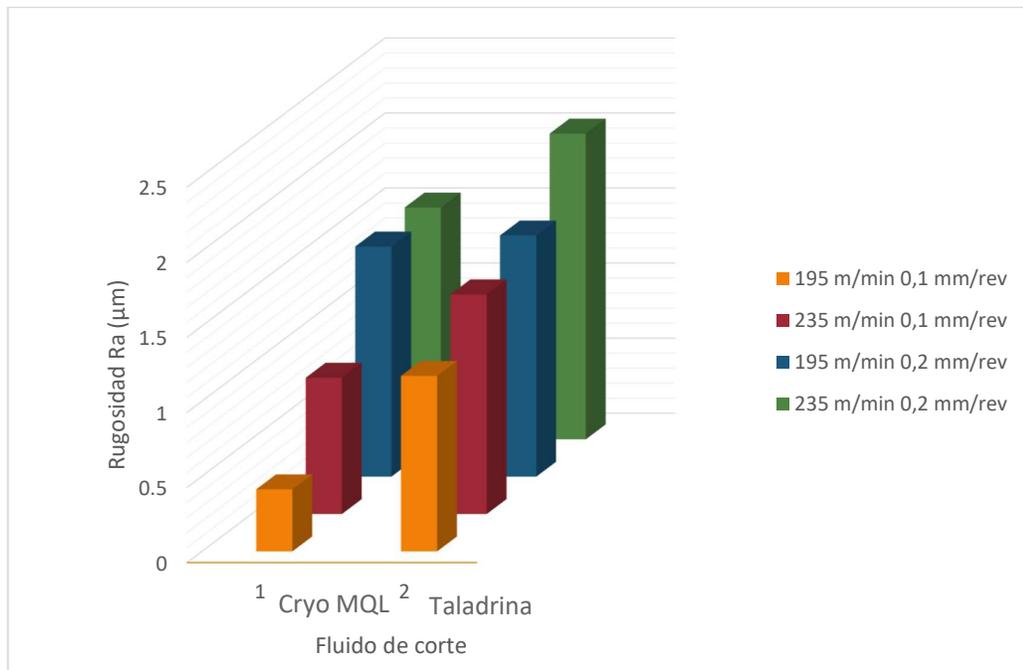


Fig. 27 Representación gráfica de los resultados de Rugosidad Ra medidos

En la figura 27 se visualiza que el menor valor de rugosidad obtenido fue con las condiciones de corte de  $V_c = 195$  m/min y  $V_f = 0,1$  mm/rev usando el sistema de lubricación híbrida de fluido criogénico de  $\text{CO}_2$  y nano fluido con nano partículas de  $\text{TiO}_2$  (CryoMQL) en donde se obtuvo un valor de  $0,4 \mu\text{m}$ ; esto representa un acabado

superficial N5 con marcas imperceptibles al tacto y a la vista. En la misma figura se observa que se mantiene un mismo patrón de comportamiento en cuanto a la rugosidad empleando este fluido de corte debido a que todos los valores de rugosidad son menores comparados con el uso de taladrina en todas las condiciones de corte. Otro resultado evidente en la gráfica es el máximo valor de Ra que se obtuvo con las condiciones de corte de  $V_c = 235$  m/min y  $V_f = 0,2$  mm/rev empleando el fluido de corte taladrina, en donde Ra es igual a  $2,03 \mu\text{m}$ , este resultado es muy común en procesos de torneado y también es aceptable dependiendo del tipo de aplicaciones que se le brinda al elemento mecanizado.

La rugosidad Ra es el valor promedio del perfil de rugosidad de un elemento y este valor permite designar el tipo de acabado superficial que se desea obtener, sin embargo, otro parámetro importante es el valor de Rz que muestra el máximo valor medido compuesto del valle más profundo y del pico más alto del perfil de rugosidades, en la tabla 11 se muestra un resumen con estos resultados.

*Tabla 11 Resultados obtenidos de las mediciones de rugosidad Rz*

<b>Rugosidad Rz (<math>\mu\text{m}</math>)</b>			
<b>Vc (m/min)</b>	<b>CryoMQL</b>	<b>Taladrina</b>	<b>Vf (mm/rev)</b>
195	2,4578	5,9784	0,1
235	4,3756	6,6098	
195	7,9572	7,8892	0,2
235	7,4732	9,6154	

Mediante la figura 28 se puede apreciar un mismo comportamiento en los resultados de rugosidad Rz puesto que el mínimo valor se obtuvo bajo las condiciones de corte de  $V_c = 195$  m/min y  $V_f = 0,1$  mm/rev empleando el fluido de corte híbrido de fluido criogénico  $\text{CO}_2$  y nano fluido con nano partículas de  $\text{TiO}_2$  (CryoMQL), así mismo, en las otras condiciones de corte se mantiene este comportamiento comparado con los resultados obtenidos empleando taladrina. Únicamente en el caso de  $V_c = 195$  m/min y  $V_f = 0,2$  mm/rev empleando CryoMQL se obtuvo un Rz ligeramente superior. De igual manera que en el Ra; el máximo Rz se obtuvo en las condiciones de corte de  $V_c = 235$  m/min y  $V_f = 0,2$  mm/rev empleando taladrina.

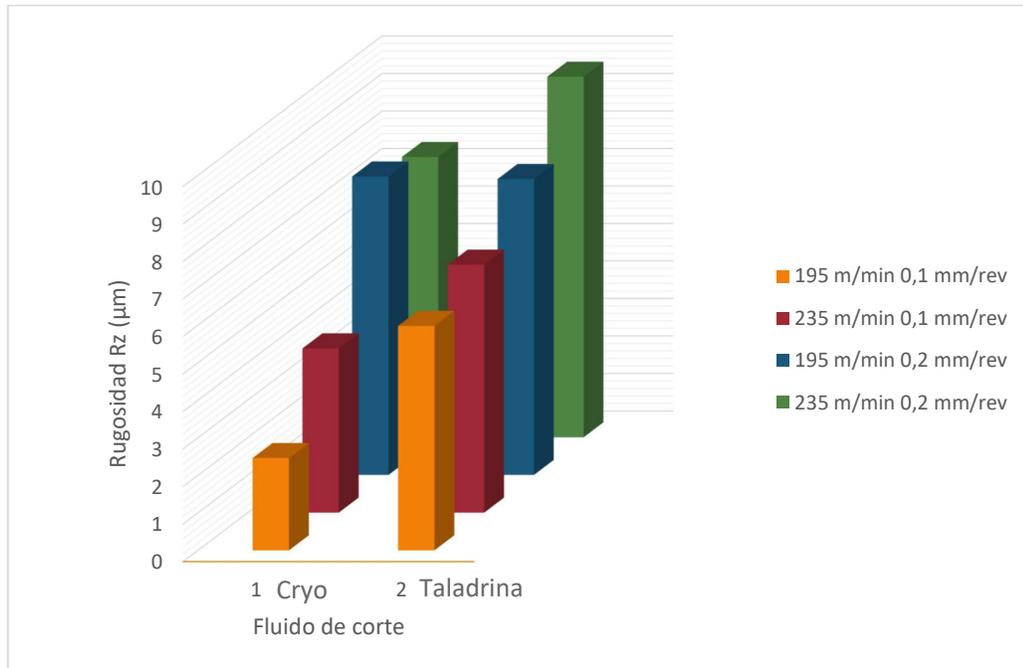


Fig. 28 Representación gráfica de los resultados de Rugosidad Rz medidos

### 3.1.5.2. Desgaste final de flanco a 60 minutos

En la tabla 12 se muestra un resumen de las mediciones de desgaste obtenidas a los 60 min de mecanizado para cada una de las condiciones de corte planteadas y con los fluidos de corte propuestos, en la figura 29 se representa de forma general los resultados obtenidos mediante una gráfica de barras.

Tabla 12 Resumen de las mediciones de desgaste obtenidas a los 60 minutos de mecanizado

Desgaste a 60 min			
Vc (m/min)	CryoMQL	Taladrina	Vf (mm/rev)
195	70,90	75,11	0,1
235	58,73	65,53	
195	69,62	99,03	0,2
235	75,68	83,41	

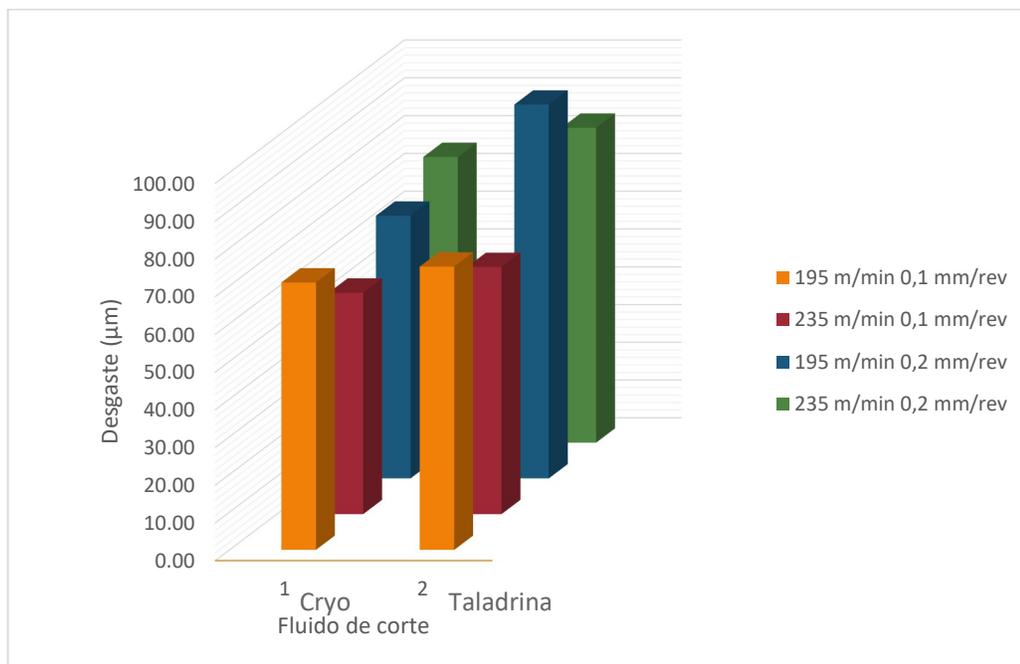


Fig. 29 Desgaste final de flanco obtenido a los 60 minutos de mecanizado

El mínimo desgaste se observa bajo las condiciones de corte de  $V_c = 235$  m/min y  $V_f = 0,1$  mm/rev empleando el fluido de corte de CryoMQL con nano  $TiO_2$ ; mientras que el desgaste máximo se observa a  $V_c = 195$  m/min y  $V_f = 0,2$  mm/rev empleando taladrina como fluido de corte.

### 3.1.5.3. Vida útil de la herramienta de corte en función de la velocidad de corte $V_c$

Análisis del desgaste de filo de la herramienta de corte en función del fluido de corte, en la tabla 13 se muestran los parámetros de evaluación del experimento 1 y 5.

Tabla 13 Resumen de resultados de las mediciones de desgaste del filo de la herramienta en los primeros 60 minutos del experimento 1 y 5

Condiciones	Experimento	VB (µm)			
		5 min	20 min	40 min	60 min
195 m/min 0,1 mm/rev Taladrina	1	43,23	52,86	56,71	75,11
195 m/min 0,1 mm/rev Cryo MQL	5	36,56	60,92	65,02	70,90

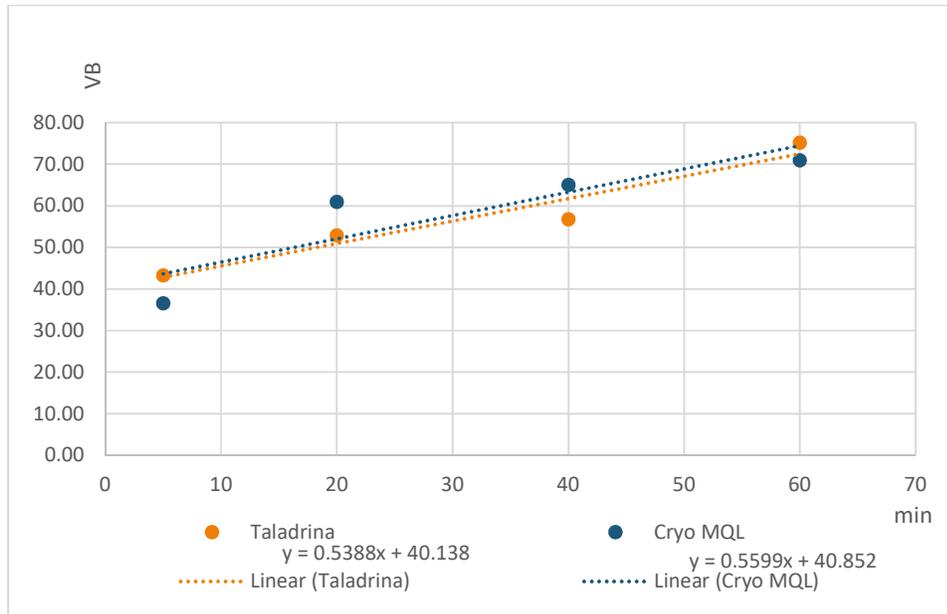


Fig. 30 Vida útil de la herramienta de corte  $V_c = 195 \text{ m/min}$  y  $V_f = 0,1 \text{ mm/rev}$

En la figura 30 se muestra la evolución del desgaste del flanco de la herramienta de corte bajo las condiciones de  $V_c = 195 \text{ m/min}$  y  $V_f = 0,1 \text{ mm/rev}$  con dos fluidos de corte, taladrina y Cryo MQL de nano fluido de partículas de dióxido de titanio; a partir de los puntos que rigen el comportamiento de desgaste se obtiene las líneas de tendencia que permiten conocer el nivel de desgaste que tendrá la herramienta con cada fluido. En la figura 30 se observa que en las dos propuestas de corte se mantiene una trayectoria muy similar; sin embargo, a los 60 min de mecanizado el inserto bajo el fluido de corte híbrido obtuvo una menor cantidad de desgaste.

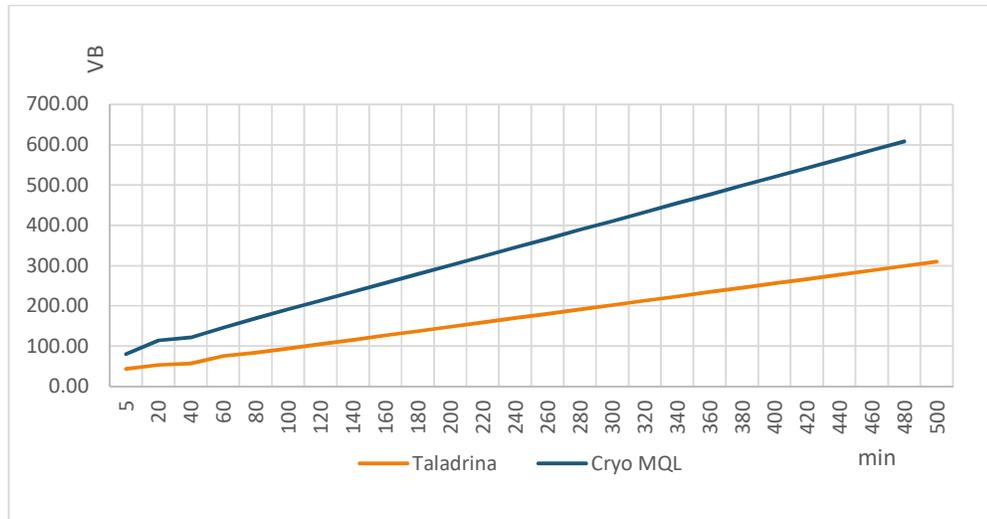


Fig. 31 Vida útil de la herramienta de corte proyectada a  $V_c = 195 \text{ m/min}$  y  $V_f = 0,1 \text{ mm/rev}$

En la figura 31 se presentan las proyecciones de la vida útil de la herramienta de corte bajo las condiciones de  $V_c = 195 \text{ m/min}$  y  $V_f = 0,1 \text{ mm/rev}$  con dos fluidos de corte, taladrina y Cryo MQL con nanofluido de partículas de dióxido de titanio. Utilizando taladrina, el desgaste VB de  $300 \mu\text{m}$  se obtiene a los 482,3 min de mecanizado, mientras que en fluido de corte híbrido el desgaste VB de  $300 \mu\text{m}$  se obtiene a los 462,8 min de mecanizado. Mediante estas proyecciones se puede conocer que la herramienta de corte bajo el sistema de lubricación tradicional tiene un aumento en la vida útil del 4,21% comparado con el fluido de corte propuesto.

Para el análisis del desgaste de filo de la herramienta de corte en función del fluido de corte, en la tabla 14 se muestran los parámetros de evaluación del experimento 2 y 6.

Tabla 14 Resumen de resultados de las mediciones de desgaste del filo de la herramienta en los primeros 60 min del experimento 2 y 6

Condiciones	Experimento	VB ( $\mu\text{m}$ )			
		5 min	20 min	40 min	60 min
235m/min 0,1 mm/rev Taladrina	2	40,95	48,26	59,42	65,53
235m/min 0,1 mm/rev Cryo MQL	6	39,46	45,51	55,84	58,73

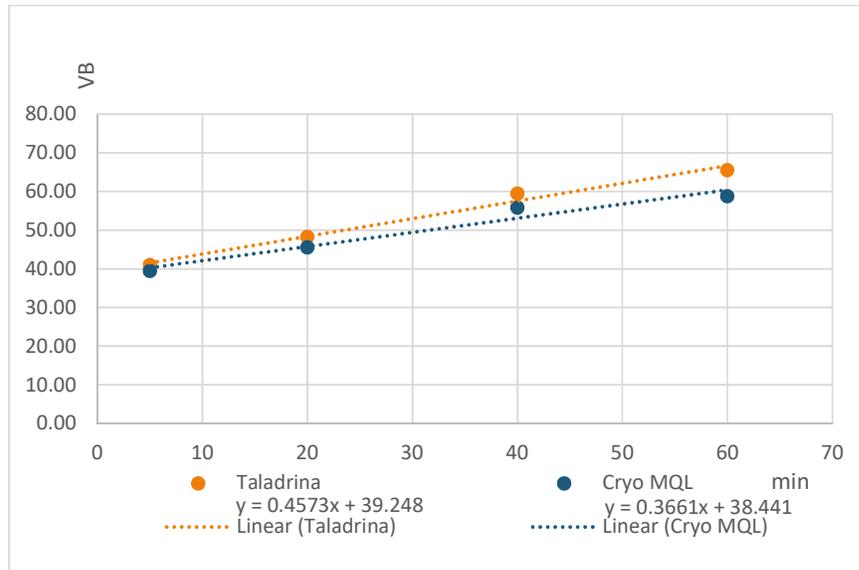


Fig. 32 Vida útil de la herramienta de corte proyectada a  $V_c = 235$  m/min y  $V_f = 0,1$  mm/rev

En la figura 32 se muestra la evolución del desgaste del flanco de la herramienta de corte bajo las condiciones de 235 m/min a 0,1 mm/rev con dos fluidos de corte, taladrina y Cryo MQL de nano fluido de partículas de dióxido de titanio; a partir de los puntos que rigen el comportamiento de desgaste se obtiene las líneas de tendencia que permiten conocer el nivel de desgaste que tendrá la herramienta con cada fluido. En la figura 32 se observa que en las dos propuestas de corte se mantiene una trayectoria muy similar; sin embargo, en el proceso de mecanizado el inserto bajo el fluido de corte híbrido obtuvo una menor cantidad de desgaste.

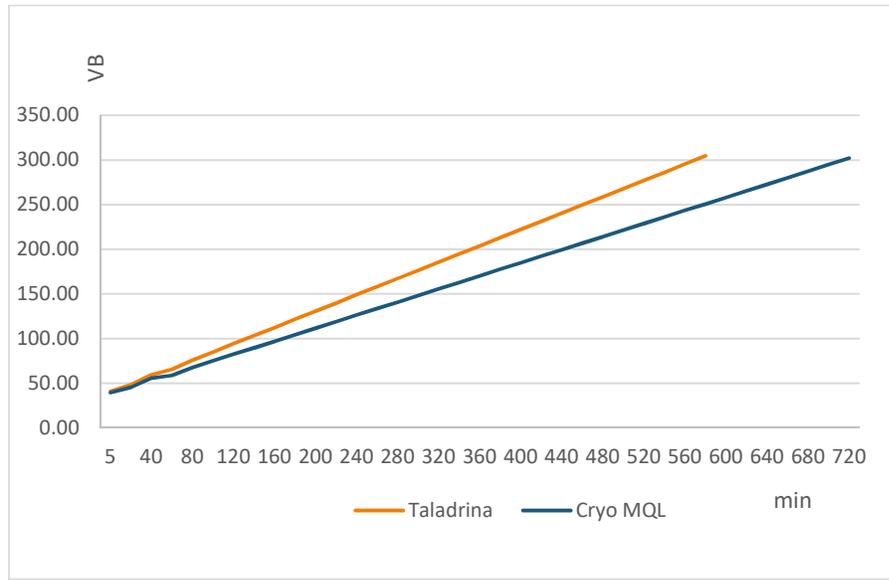


Fig. 33 Vida útil de la herramienta de corte proyectada a  $V_c = 235 \text{ m/min}$  y  $V_f = 0,1 \text{ mm/rev}$

En la figura 33 se presentan las proyecciones de la vida útil de la herramienta de corte bajo las condiciones de  $V_c = 235 \text{ m/min}$  y  $V_f = 0,1 \text{ mm/rev}$  con dos fluidos de corte, taladrina y Cryo MQL con nanofluido de partículas de dióxido de titanio. Utilizando taladrina, el desgaste VB de  $300 \mu\text{m}$  se obtiene a los 570,2 min de mecanizado, mientras que en fluido de corte híbrido el desgaste VB de  $300 \mu\text{m}$  se obtiene a los 714,45 min de mecanizado. Mediante estas proyecciones se puede conocer que la herramienta de corte bajo el sistema de lubricación híbrido tiene un aumento en la vida útil del 25,3% comparado con el sistema tradicional de inundación.

Para el análisis del desgaste de filo de la herramienta de corte en función del fluido de corte, en la tabla 15 se muestran los parámetros de evaluación del experimento 3 y 7.

Tabla 15 Resumen de resultados de las mediciones de desgaste del filo de la herramienta en los primeros 60 minutos del experimento 3 y 7

Condiciones	Experimento	VB ( $\mu\text{m}$ )			
		5 min	20 min	40 min	60 min
195 m/min 0,2 mm/rev Taladrina	3	42,02	44,36	75,02	99,03
195 m/min 0,2 mm/rev Cryo MQL	7	36,39	48,66	61,82	69,62

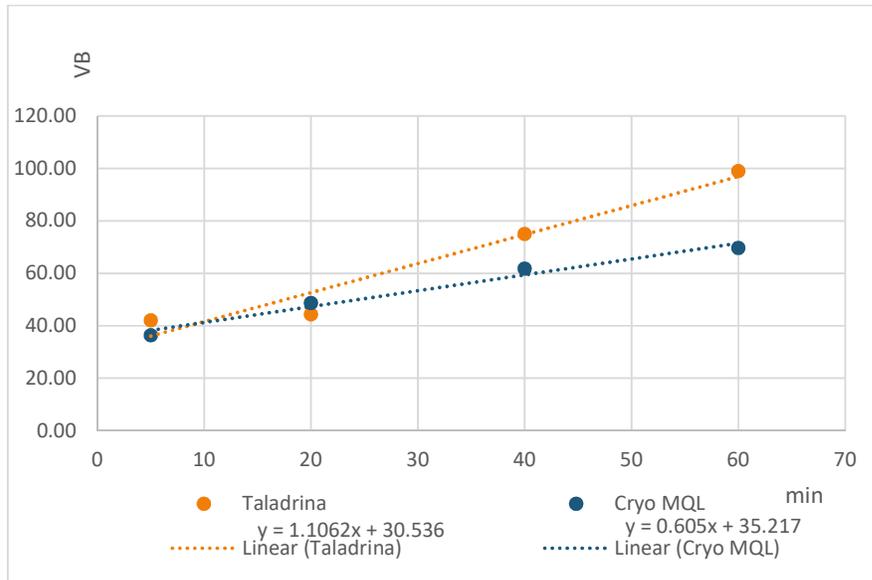


Fig. 34 Vida útil de la herramienta de corte proyectada a  $V_c = 195 \text{ m/min}$  y  $V_f = 0,2 \text{ mm/rev}$

En la figura 34 se muestra la evolución del desgaste del flanco de la herramienta de corte bajo las condiciones de  $V_c = 195 \text{ m/min}$  y  $V_f = 0,2 \text{ mm/rev}$  con dos fluidos de corte, taladrina y Cryo MQL de nano fluido de partículas de dióxido de titanio; a partir de los puntos que rigen el comportamiento de desgaste se obtiene las líneas de tendencia que permiten conocer el nivel de desgaste que tendrá la herramienta con cada fluido. En la figura 34 se observa que proceso de mecanizado del inserto bajo el fluido de corte híbrido obtuvo una menor cantidad de desgaste.



Fig. 35 Vida útil de la herramienta de corte proyectada a  $V_c = 195 \text{ m/min}$  y  $V_f = 0,2 \text{ mm/rev}$

En la figura 35 se presentan las proyecciones de la vida útil de la herramienta de corte bajo las condiciones de  $V_c = 195 \text{ m/min}$  y  $V_f = 0,2 \text{ mm/rev}$  con dos fluidos de corte, taladrina y Cryo MQL con nanofluido de partículas de dióxido de titanio. Utilizando taladrina, el desgaste VB de  $300 \mu\text{m}$  se obtiene a los 243,6 min de mecanizado, mientras que en fluido de corte híbrido el desgaste VB de  $300 \mu\text{m}$  se obtiene a los 437,7 min de mecanizado. Mediante estas proyecciones se puede conocer que la herramienta de corte bajo el sistema de lubricación híbrido tiene un aumento en la vida útil del 79,68% comparado con el sistema tradicional de inundación.

Para el análisis del desgaste de filo de la herramienta de corte en función del fluido de corte, en la tabla 16 se muestran los parámetros de evaluación del experimento 4 y 8.

Tabla 16 Resumen de resultados de las mediciones de desgaste del filo de la herramienta en los primeros 60 minutos del experimento 4 y 8

Condiciones	Experimento	VB ( $\mu\text{m}$ )			
		5 min	20 min	40 min	60 min
235 m/min 0,2 mm/rev Taladrina	4	41,31	57,57	70,22	83,41
235 m/min 0,2 mm/rev Cryo MQL	8	39,61	56,47	68,12	75,68

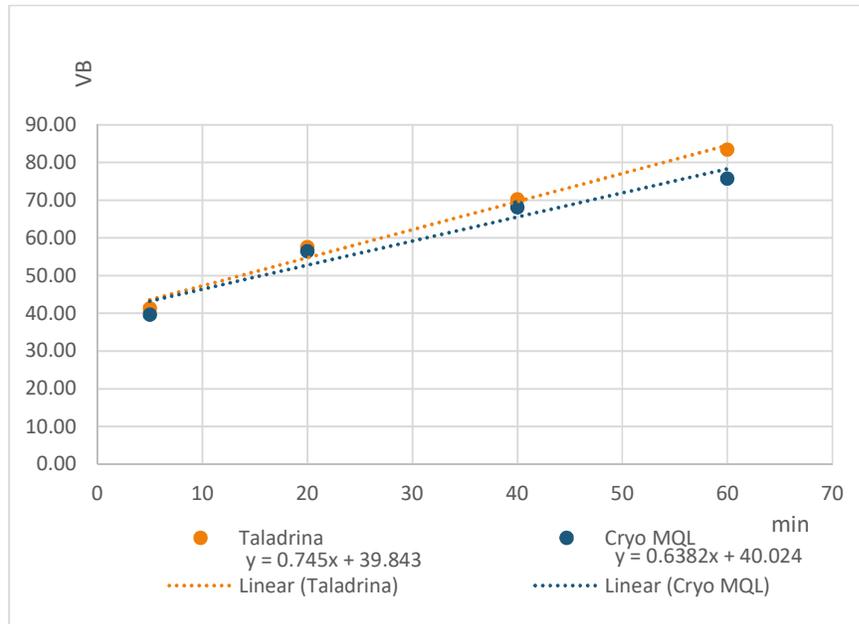


Fig. 36 Vida útil de la herramienta de corte proyectada a  $V_c = 235 \text{ m/min}$  y  $V_f = 0,2 \text{ mm/rev}$

En la figura 36 se muestra la evolución del desgaste del flanco de la herramienta de corte bajo las condiciones de  $V_c = 235 \text{ m/min}$  y  $V_f = 0,2 \text{ mm/rev}$  con dos fluidos de corte, taladrina y Cryo MQL de nano fluido de partículas de dióxido de titanio; a partir de los puntos que rigen el comportamiento de desgaste se obtiene las líneas de tendencia que permiten conocer el nivel de desgaste que tendrá la herramienta con cada fluido. En la figura 36 se observa que proceso de mecanizado tuvo una evolución similar, sin embargo, el inserto bajo el fluido de corte híbrido obtuvo una menor cantidad de desgaste.

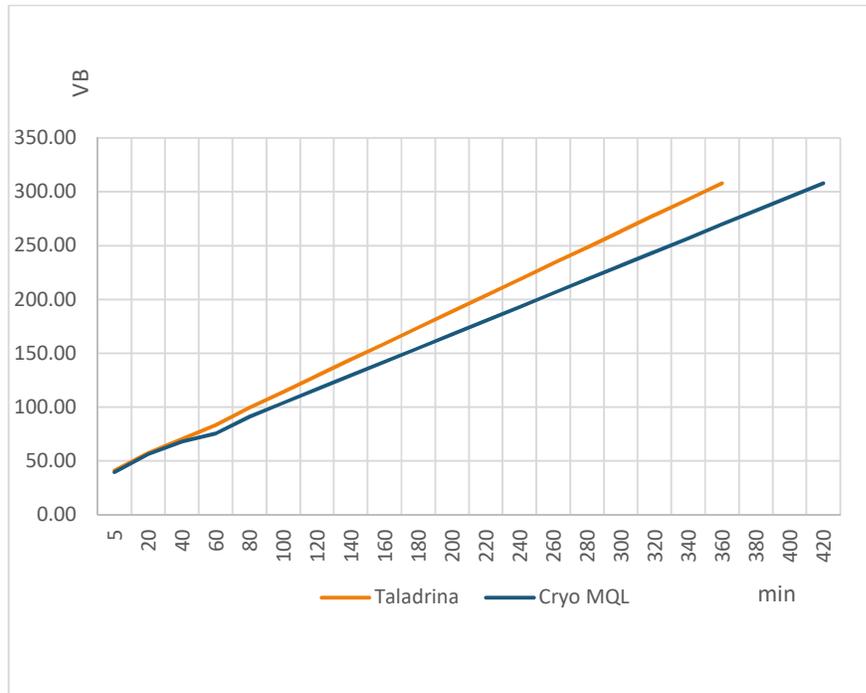


Fig. 37 Vida útil de la herramienta de corte proyectada a  $V_c = 235$  m/min y  $V_f = 0,2$  mm/rev

En la figura 37 se presentan las proyecciones de la vida útil de la herramienta de corte bajo las condiciones de  $V_c = 235$  m/min y  $V_f = 0,2$  mm/rev con dos fluidos de corte, taladrina y Cryo MQL con nanofluido de partículas de dióxido de titanio. Utilizando taladrina, el desgaste VB de 300  $\mu\text{m}$  se obtiene a los 349,2 min de mecanizado, mientras que en fluido de corte híbrido el desgaste VB de 300  $\mu\text{m}$  se obtiene a los 407,4 min de mecanizado. Mediante estas proyecciones se puede conocer que la herramienta de corte bajo el sistema de lubricación híbrido tiene un aumento en la vida útil del 16,67% comparado con el sistema tradicional de inundación.

#### 3.1.5.4. Evaluación de la vida útil de la herramienta de corte mediante cálculos (Ecuación de Taylor)

La ecuación de Taylor permite hacer una estimación de la vida útil de la herramienta de corte, los parámetros necesarios para la obtención de cada término de la ecuación se pueden extraer de los datos recolectados en los ensayos efectuados con la finalidad de calcular la constante C de la ecuación que se presenta a continuación:

$$V_C * T_c^{1/k} = C$$

Cada término de la ecuación corresponde a:

$V_c = \text{velocidad de corte (m/min)}$

$T_c = \text{vida útil de la herramienta (min)}$

$k = \text{tg } \alpha \text{ define la pendiente de la curva de desgaste}$

$C = \text{constante}$

Para el cálculo los parámetros  $k$  y  $C$  se efectuó el procedimiento 11.3 de la norma ISO3685 [23]. En este caso se está analizando un solo material de los insertos que corresponde a carburo sinterizado, especificación del inserto CNMG120408.

A continuación, se muestran las definiciones de la notación utilizada para los cálculos.

$n$ : número de experimentos

$x$ :  $\log(V_c)$

$y$ :  $\log(T_c)$

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum y}{n}$$

$$y = a + k(x - \bar{x})$$

$$a = k(\bar{x} - \log(C))$$

$$k = \frac{\sum xy - \left[ \frac{\sum x * \sum y}{n} \right]}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}$$

Tabla 17 Valores calculados para la obtención de la ecuación de Taylor con el fluido de corte taladrina

Carburo sinterizado CNMG 120408							
Fluido de corte: Taladrina							
Número de experimento	Vc (m/min)	Tc (min)	x=log(Vc)	y =log(Tc)	x*y	x^2	y^2
1	195	482,30	2,290	2,683	6,145	5,244	7,200
2	235	570,20	2,371	2,756	6,535	5,622	7,596
3	195	243,59	2,290	2,387	5,466	5,244	5,696
4	235	349,20	2,371	2,543	6,030	5,622	6,467
Sumatorias			9,322	10,369	24,175	21,732	26,959
		$(\sum x)^2$	86,90				
		$\frac{(\sum x)^2}{n}$	21,73				
		$\sum x * \sum y$	96,66				
		$\frac{\sum x * \sum y}{n}$	24,17				

Tabla 18 Valores calculados para C

$\bar{x}$	2,33
$\bar{y}$	2,59
a	2,59
k	-1,41
-1/k	0,707
log C	4,164
C	14593,19

Definición de la ecuación de Taylor para el mecanizado con taladrina como fluido de corte.

$$V_c * T_c^{\frac{1}{1,41}} = 14593,19$$

Tc es el tiempo de vida útil en función de la velocidad de corte, mediante esta ecuación se puede predecir hasta cuántos minutos durará la herramienta de corte bajo las condiciones de corte Vc de cualquier magnitud y fluido de corte taladrina.

Tabla 19 Valores calculados para la obtención de la ecuación de Taylor con el fluido de corte híbrido

Carburo sinterizado CNMG 120408							
Fluido de corte: Lubricación híbrida de fluido criogénico CO2 y nano fluido de TiO2							
Número de experimento	Vc (m/min)	Tc (min)	x=log(Vc)	y =log(Tc)	x*y	x^2	y^2
1	195	462,85	2,290	2,665	6,104	5,244	7,105
2	235	714,45	2,371	2,854	6,767	5,622	8,145
3	195	437,66	2,290	2,641	6,048	5,244	6,976
4	235	407,36	2,371	2,610	6,188	5,622	6,812
Sumatorias			9,322	10,771	25,108	21,732	29,037
			$(\sum x)^2$	86,90			
			$\frac{(\sum x)^2}{n}$	21,73			
			$\sum x * \sum y$	100,40			
			$\frac{\sum x * \sum y}{n}$	25,10			

Tabla 20 Valores calculados para C

$\bar{x}$	2,33
$\bar{y}$	2,69
a	2,69
k	-0,97
-1/k	1,0298
log C	5,103
C	126900,54

Definición de la ecuación de Taylor para el mecanizado con fluido de corte híbrido compuesto de fluido criogénico CO<sub>2</sub> y nano fluido de partículas de TiO<sub>2</sub>.

$$V_c * T_c^{\frac{1}{0,97}} = 126900,54$$

Tc es el tiempo de vida útil en función de la velocidad de corte, mediante esta ecuación se puede predecir hasta cuántos minutos durará la herramienta de corte bajo las condiciones de corte Vc de cualquier magnitud y fluido de corte híbrido.

En la tabla 21 se muestran los valores obtenidos para las gráficas correspondientes de Tc (Tiempo de vida útil de la herramienta de corte min) vs Vc (Velocidad de corte m/min) calculados mediante la ecuación de Taylor.

*Tabla 21 Valores de Tc calculados mediante la ecuación de Taylor*

<b>Vc (m/min)</b>	<b>Tc (min) [Taladrina]</b>	<b>Tc (min) [Cryo MQL]</b>
195	446,22	539,48
200	430,53	526,38
205	415,76	513,90
210	401,84	502,02
215	388,69	490,68
220	376,26	479,85
225	364,49	469,49
230	353,34	459,57
235	342,76	450,08
240	332,71	440,97
245	323,15	432,23
250	314,05	423,83
255	305,38	415,76
260	297,11	407,99
265	289,22	400,51
270	281,67	393,31
275	274,46	386,36
280	267,56	379,66
285	260,95	373,19
290	254,61	366,94
295	248,53	360,90
300	242,69	355,06

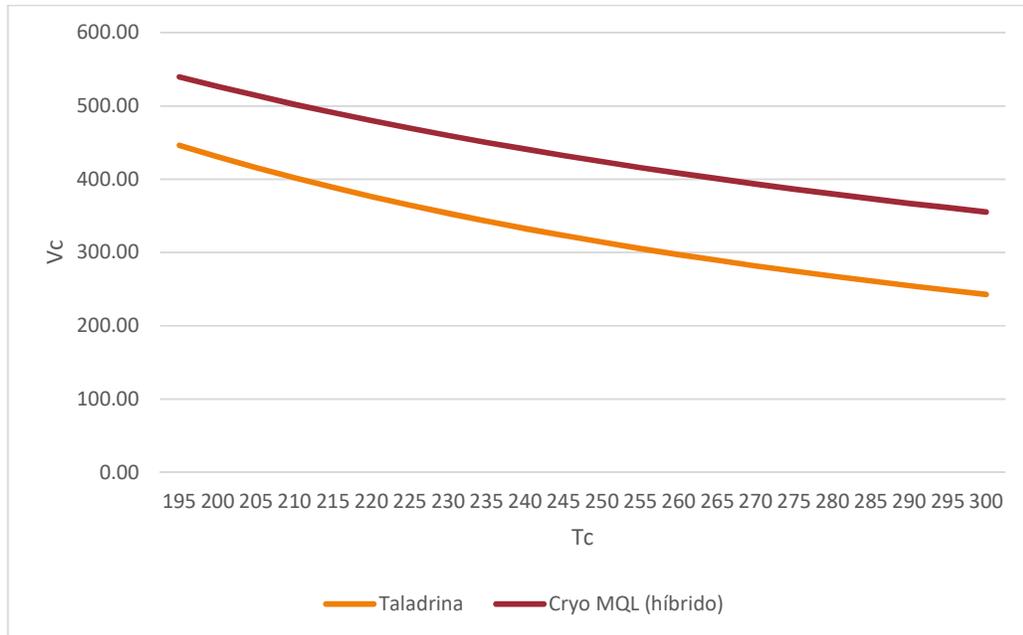


Fig. 38 Tc de la herramienta CNMG120408 con la ecuación de Taylor comparativa para dos fluidos de corte

En la figura 38 se muestra el comportamiento de la herramienta en función del fluido de corte empelado, se observa que el fluido híbrido compuesto de CO<sub>2</sub> criogénico y nano fluido de TiO<sub>2</sub> alcanza una mayor vida útil; empleando una velocidad de corte de 195 m/min la herramienta trabajará hasta alcanzar un desgaste VB de 300  $\mu$ m un total de 539 min, mientras que trabajando a una velocidad de corte superior de 300 m/min la herramienta trabajará 355 min hasta alcanzar un desgaste VB de 300  $\mu$ m.

En el caso del fluido de corte taladrina para el trabajo con la herramienta se obtiene que al emplear una velocidad de 195 m/min la herramienta durará 446 min hasta alcanzar un desgaste VB de 300  $\mu$ m; y al incrementar la velocidad a 300 m/min, la herramienta durará 242 min. Los valores de VB de 300  $\mu$ m son los que establece la norma ISO 3685 como límite en donde la herramienta puede desempeñar su función sin alterar la geometría y el acabado superficial en un elemento mecanizado en torno.

Con estos resultados se obtiene que la vida útil de la herramienta de corte aumenta de 20% a 40% dependiendo de la velocidad de corte, al emplear el sistema de lubricación híbrido.

### 3.1.5.5. Mecanismos de desgaste

En la tabla 22 se muestra un resumen de los mecanismos de desgaste presentes en las herramientas de corte empleadas para el proceso de mecanizado en torno bajo las condiciones de corte descritas en la metodología con los dos fluidos de corte propuestos.

Tabla 22 Comparación de los mecanismos de desgaste presentes en los dos procesos de mecanizado

Mecanismos de desgaste presentes en la herramienta de corte	
Taladrina	Híbrido
<p>Adhesión de material</p> <p>Abrasión</p> <p>Daño por flujo de viruta</p>	<p>Abrasión</p> <p>BUE</p>
<p>Adhesión de material</p> <p>Abrasión</p>	<p>Adhesión de material</p> <p>Abrasión</p>
<p>Adhesión de material</p> <p>Abrasión</p> <p>BUE</p>	<p>Adhesión de material</p> <p>Fractura</p> <p>Abrasión</p>
<p>Adhesión de material</p> <p>Abrasión</p>	<p>Adhesión de material</p> <p>Abrasión</p>

En todas las herramientas de corte se presencian tres mecanismos de desgaste principales, en el caso de la abrasión, corresponde a un proceso de desgaste natural en la herramienta de corte por el contacto de la herramienta con un material duro; otro mecanismo de desgaste que se evidenció es BUE o filo de aportación que se produce por el soldeo de la viruta en la herramienta de corte, en el uso de taladrina se observa en mayor cantidad este mecanismo, mientras que utilizando el fluido de corte híbrido se observa solo en uno de los insertos. La adhesión de material se presencia en los dos procesos de mecanizado, sin embargo, en el uso de taladrina es mucho mayor. Finalmente se observan daños por el flujo de la viruta como pequeñas fracturas presentes en el flanco de la herramienta que corresponden a un desgaste mecánico que puede presentarse por múltiples factores incluyendo el martilleo de la viruta; este mecanismo no se evidenció en todos los insertos.

#### ***3.1.5.6. Verificación de la hipótesis***

Para la verificación de la hipótesis se utilizó la metodología de T-Student para evaluar diferencias significativas entre las variables de estudio.

#### ***Hipótesis:***

El sistema híbrido “plug and play” de lubricación pulverizada con nano fluido y fluido criogénico permitirá mejorar el desempeño de la herramienta de mecanizado por arranque de viruta en torneado.

#### ***Variable dependiente***

El desempeño de los procesos de mecanizado por arranque de viruta en torneado.

En este caso el desempeño se mide en función del acabado superficial y de la vida útil de la herramienta de corte. Para el acabado superficial se aplica la metodología de T-Student; mientras que para la vida útil de la herramienta, se validaron los resultados mediante el cálculo de  $T_c$  con la ecuación de Taylor en donde se obtuvo que el sistema de lubricación híbrido de fluido criogénico y de nano fluido de  $TiO_2$  aumenta la vida útil de la herramienta de corte en un rango de 20% a 40% en función de la velocidad de corte que se emplee en el proceso; sin embargo, también se hará un análisis de T-Student para la vida útil de la herramienta de corte.

### ***Variable independiente***

El sistema híbrido “plug and play” de lubricación pulverizada con nano fluido y fluido criogénico.

### ***Hipótesis nula Ho:***

El sistema híbrido “plug and play” de lubricación pulverizada con nano fluido y fluido criogénico no mejorará el desempeño de la herramienta de mecanizado por arranque de viruta torneado.

- a) El acabado superficial se mantiene igual al proceso que emplea lubricación con taladrina.
- b) La vida útil de la herramienta de corte se mantiene igual al proceso que emplea lubricación con taladrina.

### ***Hipótesis alterna Ha:***

El sistema híbrido “plug and play” de lubricación pulverizada con nano fluido y fluido criogénico mejorará el desempeño de la herramienta de mecanizado por arranque de viruta torneado.

- a) El acabado superficial es distinto al proceso que emplea lubricación con taladrina.
- b) La vida útil de la herramienta de corte es distinta al proceso que emplea lubricación con taladrina.

### ***Desarrollo de la verificación de hipótesis a):***

$$H_0 = Ra(\text{taladrina}) = Ra(\text{híbrido CryoMQL})$$

$$H_a = Ra(\text{taladrina}) \neq Ra(\text{híbrido CryoMQL})$$

### ***Nivel de confianza***

Se emplea un nivel de confianza del 95%, nivel de significancia del 5% y una probabilidad de 0,05.

**Obtención del valor de t crítico**

Los grados de libertad se obtienen a partir del número de muestras en cada experimento, en este caso es igual a:

*n1: número de muestras del experimento con taladrina*

*n2: número de muestras del experimento con el sistema híbrido Cryo MQL*

*v: grados de libertad*

$$v = n1 + n2 - 2$$

$$v = 4 + 4 - 2$$

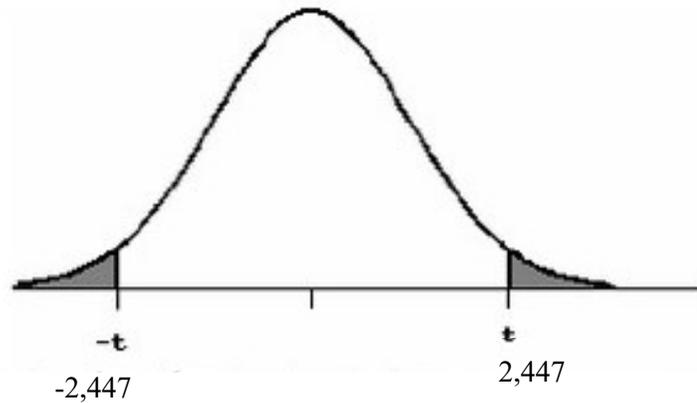
$$v = 6$$

Con el valor de los grados de libertad y de la probabilidad se selecciona y valor de t con el cual se hará la verificación de la hipótesis.

Tabla 23 Distribución de T de Student [25]

TABLA DE LA DISTRIBUCIÓN T DE STUDENT						
GRADOS DE LIBERTAD	ÁREA EN UNA COLA					
	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005	0.0005
	ÁREA EN DOS COLAS					
	MSc. GABRIEL HEREDIA VILLARROEL					
	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.001
1	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	636.619
2	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	31.599
3	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	12.924
4	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	8.610
5	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.869
6	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.959
7	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	5.408
8	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	5.041
9	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.781
10	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587
11	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.437
12	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	4.318
13	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	4.221
14	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	4.140
15	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	4.073

El valor obtenido mediante la tabla 23 es de 2,447



***Cálculo del valor de t de prueba***

Para el cálculo de la desviación estándar mancomunada se emplea la siguiente fórmula:

$$S_c = \frac{\sum(n1 - 1) * S_x^2 + \sum(n2 - 1)S_y^2}{v}$$

Los términos de la fórmula se definen como:

*Sc: corresponde a la desviación estándar mancomunada*

*Sx: Desviación estándar de los valores de rugosidad Ra del proceso de mecanizado con taladrina*

*Sy: Desviación estándar de los valores de rugosidad Ra del proceso de mecanizado con el sistema híbrido*

Para el cálculo de t de prueba se emplea la siguiente fórmula:

$$t = \frac{\mu_x - \mu_y}{\sqrt{\frac{S_c^2}{n1} + \frac{S_c^2}{n2}}}$$

Los términos que faltan definir de la ecuación son:

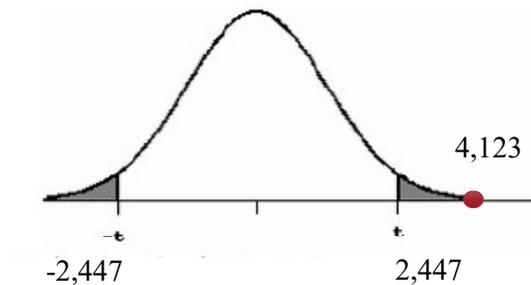
*μx: Valores promedio de la rugosidad Ra del sistema de lubricación con taladrina*

$\mu y$ : Valores promedio de la rugosidad Ra del sistema de lubricación híbrido

Tabla 24 Valores calculados para la obtención de t de prueba

Nº	Taladrina (x)	$x - \mu x$	$(x - \mu x)^2$	Híbrido (y)	$y - \mu y$	$(y - \mu y)^2$
1	1,168	-0,401	0,16040	0,413	-0,686	0,471
2	1,462	-0,106	0,01126	0,907	-0,192	0,037
3	1,606	0,038	0,00147	1,533	0,433	0,188
4	2,036	0,468	0,21930	1,544	0,445	0,198
$\mu x$	1,568		$\mu y$	1,099		
Sumatoria			0,392			0,894
Varianza			0,098			0,223
Desviación estándar mancomunada			0,161			
t	4,123					

Se ubica el valor de t de prueba en la gráfica



En este caso el t (prueba) comparado con el t (crítico) de la tabla de distribución queda de la siguiente forma:

$$t(\text{prueba}) = 4,123 > t(\text{crítico}) = 2,447$$

Como conclusión se rechaza la hipótesis nula; debido a que el acabado superficial del proceso de mecanizado con el fluido de corte híbrido es distinto al proceso que emplea lubricación con taladrina.

**Desarrollo de la verificación de hipótesis b):**

$$H_0 = Tc(\text{taladrina}) = Tc(\text{híbrido CryoMQL})$$

$$H_a = Tc(\text{taladrina}) \neq Tc(\text{híbrido CryoMQL})$$

### ***Nivel de confianza***

Se emplea un nivel de confianza del 95%, nivel de significancia del 5% y una probabilidad de 0,05.

### ***Obtención del valor de t crítico***

Los grados de libertad se obtienen a partir del número de muestras en cada experimento, en este caso es igual a:

*n*<sub>1</sub>: número de muestras del experimento con taladrina

*n*<sub>2</sub>: número de muestras del experimento con el sistema híbrido Cryo MQL

*v*: grados de libertad

$$v = n_1 + n_2 - 2$$

$$v = 22 + 22 - 2$$

$$v = 42$$

Con el valor de los grados de libertad y de la probabilidad se selecciona y valor de t con el cual se hará la verificación de la hipótesis.



### *Cálculo del valor de t de prueba*

Para el cálculo de la desviación estándar mancomunada se emplea la siguiente fórmula:

$$S_c = \frac{\sum(n1 - 1) * Sx^2 + \sum(n2 - 1)Sy^2}{v}$$

Los términos de la fórmula se definen como:

*Sc: corresponde a la desviación estándar mancomunada*

*Sx: Desviación estándar de los valores de vida útil del proceso de mecanizado con taladrina*

*Sy: Desviación estándar de los valores de vida útil del proceso de mecanizado con el sistema híbrido*

Para el cálculo de t de prueba se emplea la siguiente fórmula:

$$t = \frac{\mu x - \mu y}{\sqrt{\frac{Sc^2}{n1} + \frac{Sc^2}{n2}}}$$

Los términos que faltan definir de la ecuación son:

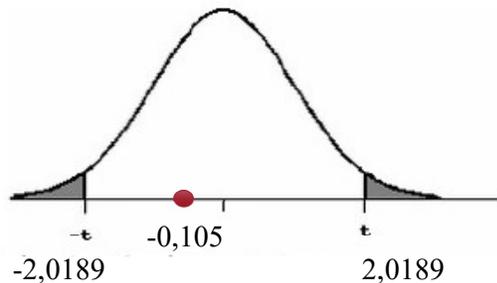
*μx: Valores promedio de la vida útil del sistema de lubricación con taladrina*

*μy: Valores promedio de la vida útil del sistema de lubricación híbrido*

Tabla 26 Valores calculados para la obtención de t de prueba

Nº	Taladrina (x)	x - $\mu_x$	(x - $\mu_x$ ) <sup>2</sup>	Híbrido (y)	y - $\mu_y$	(y - $\mu_y$ ) <sup>2</sup>
1	446,224	118,406	14019,946	539,477	104,560	10932,867
2	430,535	102,716	10550,673	526,376	91,459	8364,770
3	415,764	87,946	7734,508	513,905	78,988	6239,095
4	401,838	74,020	5479,002	502,019	67,102	4502,710
5	388,690	60,872	3705,452	490,679	55,762	3109,350
6	376,260	48,442	2346,667	479,846	44,929	2018,618
7	364,494	36,676	1345,133	469,488	34,571	1195,165
8	353,342	25,524	651,490	459,574	24,657	607,980
9	342,761	14,943	223,285	450,076	15,159	229,802
10	332,709	4,891	23,922	440,968	6,051	36,619
11	323,150	-4,668	21,788	432,227	-2,690	7,236
12	314,051	-13,767	189,529	423,830	-11,087	122,916
13	305,381	-22,437	503,430	415,758	-19,159	367,061
14	297,111	-30,707	942,902	407,992	-26,925	724,949
15	289,217	-38,601	1490,039	400,515	-34,402	1183,500
16	281,674	-46,144	2129,254	393,311	-41,606	1731,074
17	274,461	-53,357	2846,956	386,365	-48,552	2357,304
18	267,558	-60,260	3631,287	379,664	-55,253	3052,943
19	260,946	-66,872	4471,889	373,194	-61,723	3809,730
20	254,608	-73,210	5359,709	366,944	-67,973	4620,284
21	248,529	-79,290	6286,825	360,903	-74,013	5477,996
22	242,693	-85,125	7246,307	355,061	-79,856	6376,951
$\mu_x$	327,818		$\mu_y$	434,917		
Sumatoria			81199,993			67068,923
Varianza			3690,909			3048,587
Desviación estándar mancomunada						3369,748
t						-0,105

Se ubica el valor de t de prueba en la gráfica



En este caso el t (prueba) comparado con el t (crítico) de la tabla de distribución queda de la siguiente forma:

$$t(\text{prueba}) = -0,105 > t(\text{crítico}) = -2,447$$

Como conclusión se acepta la hipótesis nula toda vez que, el valor de t calculado se ubica de la zona de aceptación de  $H_0$ ; debido a que la vida útil de la herramienta de corte en la lubricación híbrida se mantiene igual al proceso que emplea lubricación con taladrina.

De manera general se comprueba que el proceso de lubricación y enfriamiento propuesto mejora los procesos de mecanizado en torno, ya que existe un aumento en el acabado superficial de los elementos mecanizados y según lo expuesto en el análisis de  $T_c$  en referencia a la ISO 3685 se alcanzó un aumento de hasta el 40% de la vida útil de la herramienta de corte. A pesar que, la diferencia de la vida útil entre los dos fluidos de corte no sea significativa según la t de student global; sin embargo en aplicación práctica se puede utilizar los parámetros la vida expuesta y la calidad de corte alcanzada. Por otra parte, se demostró que la tasa de acabado es significativa; por lo tanto, se demuestra la hipótesis de estudio planteada.

## CAPÍTULO IV

### DESARROLLO DE LA PROPUESTA

#### ELABORACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO Y LUBRICACIÓN HÍBRIDO “PLUG AND PLAY”

##### 4.1. Datos informativos:

El sistema de enfriamiento y lubricación híbrido “plug and play” se compone principalmente por el circuito de mezcla y distribución del fluido criogénico de CO<sub>2</sub>, y del sistema de distribución MQL; su funcionamiento se basa en las condiciones descritas en el tercer capítulo en donde se describe la temperatura de trabajo, presión y flujo.

##### 4.2. Antecedentes de la propuesta:

Existe una gran cantidad de investigaciones que muestran los beneficios de aplicar el sistema MQL y el sistema de refrigeración criogénica en los procesos de manufactura por arranque de viruta; esta investigación no es la excepción, puesto que se compara su aplicación con el sistema de inundación mediante el uso de taladrina. El sistema híbrido de lubricación pulverizada con nanofluido es eficaz puesto que brinda excelentes resultados en cuanto al acabado superficial y el aumento de la vida útil de las herramientas de corte, como consecuencia de esto, se puede considerar como una alternativa ecológica para disminuir la contaminación en los procesos de mecanizado y asegurar la integridad del operario frente a los efectos negativos de exponerse a sustancias tóxicas como los aceites emulsificables.

El sistema de lubricación híbrida requiere de algunas modificaciones que se plantean en esta propuesta, así como también el desarrollo de un procedimiento de instalación y utilización de un sistema “plug and play”. En un desarrollo inicial del sistema se planteó la configuración de la tubería y accesorios para el funcionamiento de la mezcla de CO<sub>2</sub> y la adaptación de una boquilla para el direccionamiento del MQL junto con el fluido criogénico, sin embargo, los resultados fueron muy básicos como se muestra en la figura 39.



*Fig. 39 Esquema inicial del sistema de distribución del fluido criogénico ejecutado en la primera etapa*

En el desarrollo del trabajo investigativo se planteó la instalación del armario como se describe en el capítulo tres en donde se especifican los detalles solucionados con respecto a las fugas del fluido criogénico, funcionamiento de electroválvulas, y reemplazo de algunos de los componentes que no son indispensables y afectan al funcionamiento del sistema con lo cual se elaboraron los ensayos pertinentes para la evaluación de su funcionamiento. Mediante la norma ISO 3685 se evaluó la vida útil de la herramienta de corte con los dos fluidos de enfriamiento y lubricación, el fluido tradicional de método de inundación que corresponde a taladrina y el fluido de corte híbrido compuesto de fluido criogénico y nano fluido pulverizado MQL de  $TiO_2$  en donde se encontraron resultados favorables en cuanto al aumento de la vida útil en la herramienta de corte CNMG120408 y una mejora en el acabado superficial en la tubería API L80.

#### **4.3. Justificación de la propuesta:**

En el Ecuador la tecnología de lubricación y enfriamiento híbrido es nueva y se ha iniciado el proceso investigativo de su funcionamiento, así como también de evaluación de su desempeño en el proceso de fabricación por torneado al igual que en muchos otros países en donde se evalúa su factibilidad de implementación para el mecanizado de materiales de alto rendimiento, es decir, que sus propiedades mecánicas son superiores y permiten aplicarlos en muchas áreas de la industria, y por tal motivo se dificulta su proceso de mecanizado.

Localmente, en la Universidad Técnica de Ambato se han hecho estudios previos sobre el funcionamiento del sistema híbrido propuesto, y se continúa con la evaluación de los resultados con la finalidad de alcanzar a determinar su desempeño con otro tipo de materiales y con otro tipo de herramientas de corte; por tal motivo se requiere de un sistema funcional en las instalaciones del laboratorio para poder continuar con su desarrollo ya que los beneficios que brinda en la industria son numerosos.

Como consecuencia de esto se plantea la propuesta de instalación que cuenta de las especificaciones del sistema y el procedimiento a llevarse a cabo para su funcionamiento con el fin de que tanto los investigadores de la Universidad Técnica de Ambato como los estudiantes involucrados en nuevos estudios que puedan surgir lo utilicen de manera eficaz e incluso puedan brindarle un valor agregado al sistema completo.

#### **4.4. Objetivos:**

##### **4.4.1. Objetivo General:**

Elaborar un procedimiento para la instalación de un sistema híbrido “plug and play” de lubricación pulverizada con nanofluido y fluido criogénico para mecanizado en torno.

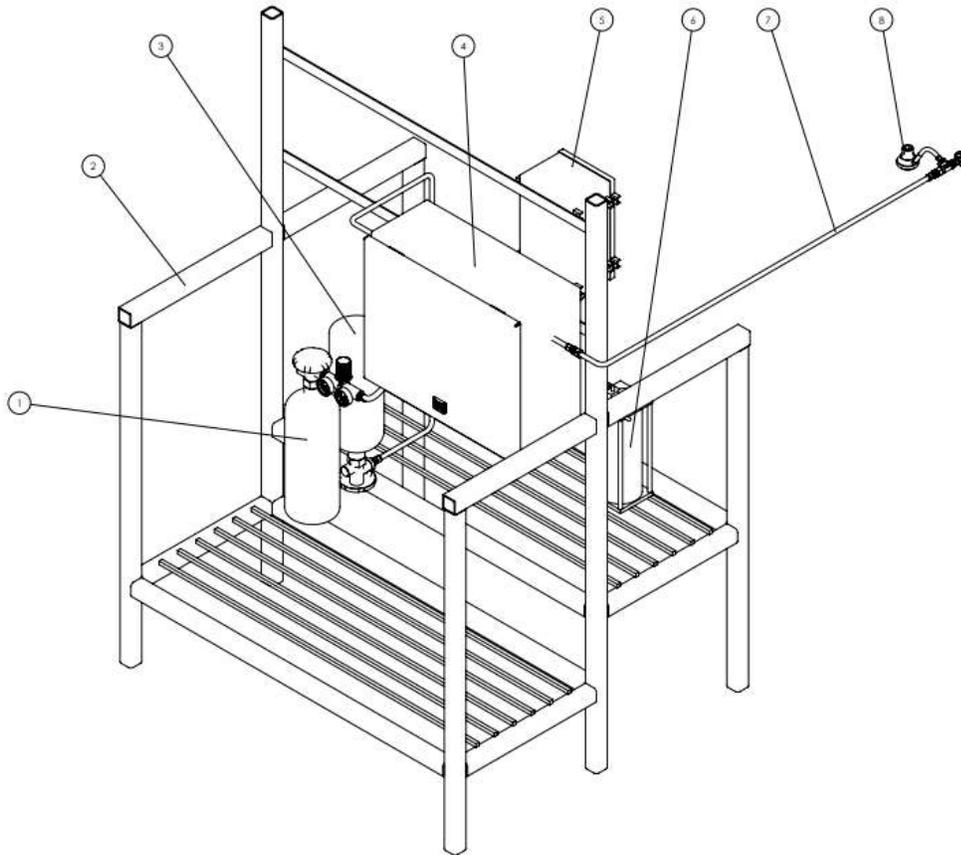
##### **4.4.2. Objetivos Específicos:**

- Describir las especificaciones técnicas y los parámetros de funcionamiento del sistema híbrido “plug and play” de lubricación pulverizada con nanofluido y fluido criogénico propuesto para el proceso de mecanizado en torno en el laboratorio de Ingeniería Mecánica de la facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.
- Desarrollar un procedimiento para la instalación del sistema híbrido “Plug and Play” de lubricación pulverizada con nanofluido y fluido criogénico.
- Describir los alcances y limitaciones del sistema híbrido “plug and play” propuesto.

### 4.3. Desarrollo:

#### 4.3.1. Descripción de las especificaciones técnicas y de los parámetros de funcionamiento iniciales del sistema híbrido “plug and play” de lubricación pulverizada con nanofluido y fluido criogénico propuesto

En la figura 40 se tiene una vista general del sistema que consta de una estructura soporte y del armario del sistema híbrido con sus cilindros.



*Fig. 40 Vista general isométrica del sistema híbrido “plug and play”*

Los componentes de la figura 39 junto con sus especificaciones se muestran en la tabla 25.

Tabla 27 Descripción de los componentes del sistema híbrido – Vista general isométrica

N° de componente	Denominación	Especificación técnica	Parámetro de funcionamiento
1	Cilindro de CO <sub>2</sub> para la fase gaseosa	Tanque de CO <sub>2</sub> de 10 kg	Se coloca en disposición vertical con la base dirigida hacia el piso. En este espacio se puede colocar un cilindro de mayor capacidad.  Apertura total de la válvula.
2	Soporte de los cilindros y del armario.	Estructura metálica.	Se compone del espacio inferior para la ubicación de los cilindros, un espacio elevado para la colocación de herramientas y del sistema MQL.
3	Cilindro de CO <sub>2</sub> para la fase líquida	Tanque de CO <sub>2</sub> de 10 kg	Se coloca en disposición vertical con la válvula dirigida hacia el piso en la zona elevada de la estructura. En este espacio se puede colocar un cilindro de mayor capacidad, o un cilindro con pescador.  Apertura de 1/8 de vuelta.
4	Armario del circuito de mezcla y distribución del fluido criogénico.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Electroválvula</li> <li>- Tubing de acero inoxidable</li> <li>- Unilock</li> <li>- Unión en T</li> <li>- Codos</li> <li>- Válvulas de alivio</li> <li>- Válvulas check</li> </ul>	Se compone de una electroválvula que controla el cierre y apertura del flujo de CO <sub>2</sub> en fase gaseosa, una línea de circulación de CO <sub>2</sub> para la fase líquida, al unirse se produce la mezcla del fluido para direccionarlo al soporte de los racores y la boquilla de MQL.
5	Armario del circuito de control para las electroválvulas.	Componentes electrónicos	Encendido y apagado de las electroválvulas.
6	Sistema de distribución MQL.	<p>Tanque de almacenamiento</p> <p>Válvula de distribución del fluido pulverizado</p>	<p>480 ml/h</p> <p>Conexión a una toma de aire a 2 bares</p> <p>Boquilla de aplicación del nano fluido</p>

7	Tubing con el fluido criogénico mezclado	Tubing de acero inoxidable de 3/8 in	Dirige el fluido criogénico cerca de la zona de corte
8	Soporte de la boquilla de MQL y racores con fluido criogénico	Impresión en PLA con agujero concéntrico para colocación de la boquilla de MQL y agujeros para la colocación de los racores de fluido criogénico	Colocación de hasta 4 racores para el direccionamiento de CO <sub>2</sub> criogénico en la zona de corte, a diferentes ángulos, 30 y 45 grados.

En la figura 41 se muestra el sistema de distribución de CO<sub>2</sub> criogénico de forma más detallada, de igual manera, en la tabla 26 se presenta la descripción de cada componente.

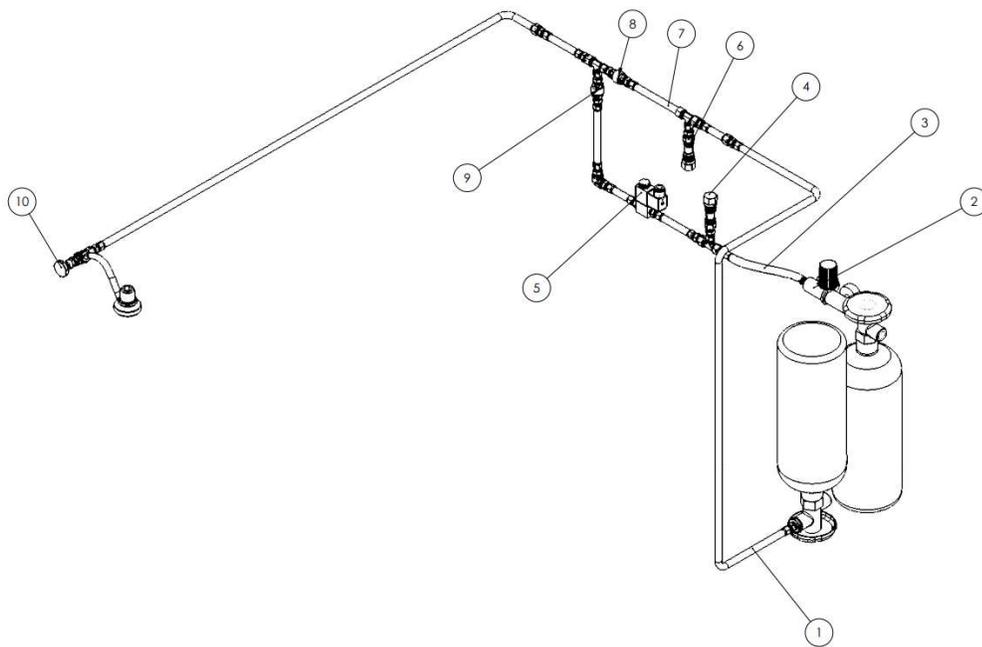


Fig. 41 Vista general isométrica del sistema de distribución de fluido criogénico

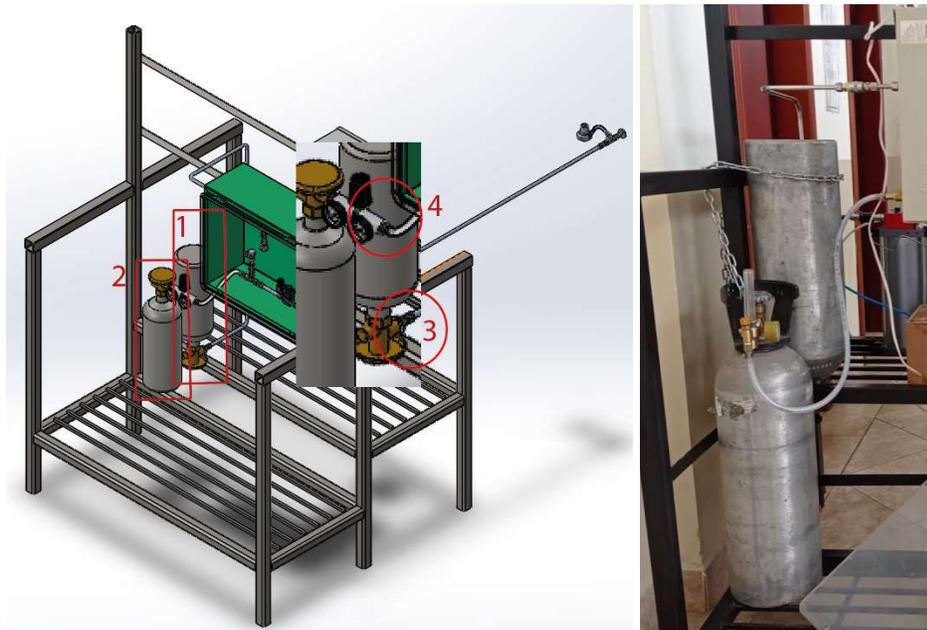
Tabla 28 Descripción de los componentes del sistema de distribución del fluido criogénico – Vista general isométrica

Nº de componente	Denominación	Especificación técnica	Parámetro de funcionamiento
1	Línea de conexión de CO <sub>2</sub> en fase líquida	Tubing de acero inoxidable con neplos de unión para acoplarlos a la válvula del cilindro	Conexión directa hacia el cilindro con la válvula colocada en dirección al piso.
2	Regulador de caudal	Dimensiones estándar de material de bronce, con indicador de presión y de flujo	Conexión al cilindro de fase gaseosa.
3	Línea de conexión del CO <sub>2</sub> en fase gaseosa	Manguera de silicona gruesa con refuerzo.	Conexión del regulador al sistema.
4	Válvula de alivio	Válvula de apertura lineal de material de bronce	Con la apertura de la válvula se despresuriza las líneas de flujo de CO <sub>2</sub> en caso de que falle la electroválvula.
5	Electroválvula	Cuerpo de bronce con accionamiento de bobina con conexión a DC 24V	Cierre y apertura del flujo de CO <sub>2</sub>
6	Válvula de alivio	Válvula de apertura lineal de material de bronce	Con la apertura de la válvula se despresuriza las líneas de flujo de CO <sub>2</sub> .
7	Tubing	Las líneas de distribución y direccionamiento, se componen de tubing de acero inoxidable de 3/8 in.	Conexión mediante unilock que debe ser bien ajustada para evitar fugas del fluido.
8	Válvula antirretorno	De material de bronce con conexión roscada.	Imposibilita el retorno del fluido hacia el cilindro.
9	Válvula antirretorno	De material de bronce con conexión roscada.	Imposibilita el retorno del fluido hacia el cilindro.
10	Válvula de aguja	De material de acero inoxidable y plástico.	Regula el caudal del fluido criogénico antes de la conexión de las mangueras.

#### 4.3.2. Procedimiento para la instalación del sistema híbrido “Plug and Play” de lubricación pulverizada con nanofluido y fluido criogénico.

En este punto se describe el proceso de conexión del sistema para su utilización en un torno manual o semiautomático debido a que para su conexión en un centro de mecanizado o en un torno CNC únicamente se debe modificar la geometría del soporte de la boquilla y racores del sistema.

Como primer aspecto se detalla la conexión del sistema de distribución de CO<sub>2</sub>.



*Fig. 42 Conexión de los cilindros*

En la figura 42 se presenta la configuración para la conexión de los cilindros; en el punto número 1 se presenta el cilindro con el CO<sub>2</sub> de fase gaseosa, este cilindro debe ser colocado como se presenta en la imagen puesto que de este modo se obtiene su producto en fase líquida y su conexión es directa como se muestra en el punto 3, no se requiere del uso de un regulador de caudal; en el punto 2 se muestra el cilindro de fase gaseosa, en este caso como se muestra en el punto 4 se coloca un regulador de caudal para la conexión del cilindro a la manguera que dirige el flujo hacia el sistema.

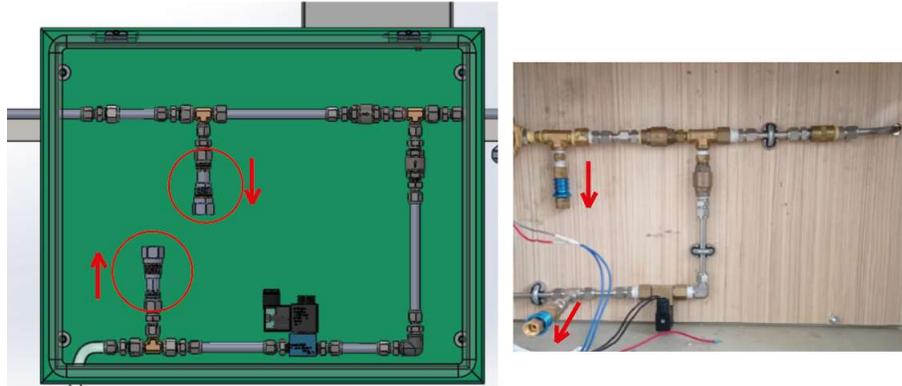


Fig. 43 Manipulación de las válvulas de alivio

En la figura 43 se muestra la configuración del circuito de distribución de fluido criogénico en el armario; las válvulas de alivio se presentan en los círculos y al moverse en dirección de las flechas se realiza su apertura con la finalidad de despresurizar el sistema en caso de fallos de alguno de sus componentes o en el caso de que existe mucha formación de hielo en la salida. Para el cierre de las válvulas de alivio se desplaza linealmente en dirección contraria a las flechas que se presentan en la imagen.

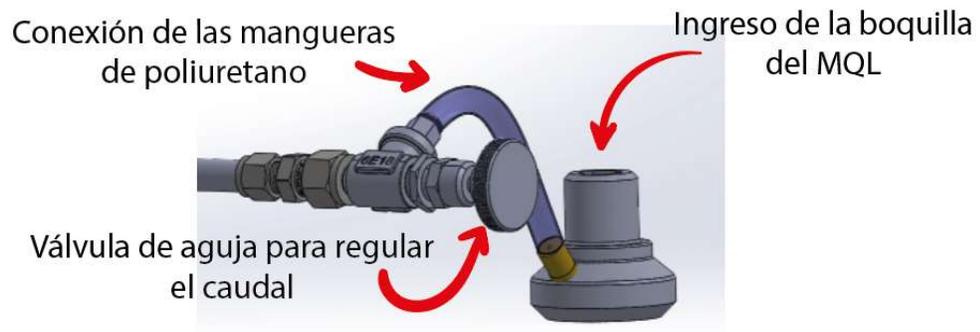


Fig. 44 Configuración de la conexión del soporte de la boquilla y racores

En la figura 44 se visualiza la configuración de cómo debe conectarse el soporte, la manguera de poliuretano debe ser lo suficientemente larga para llegar al carro de movimiento de la herramienta de corte en sentido x.

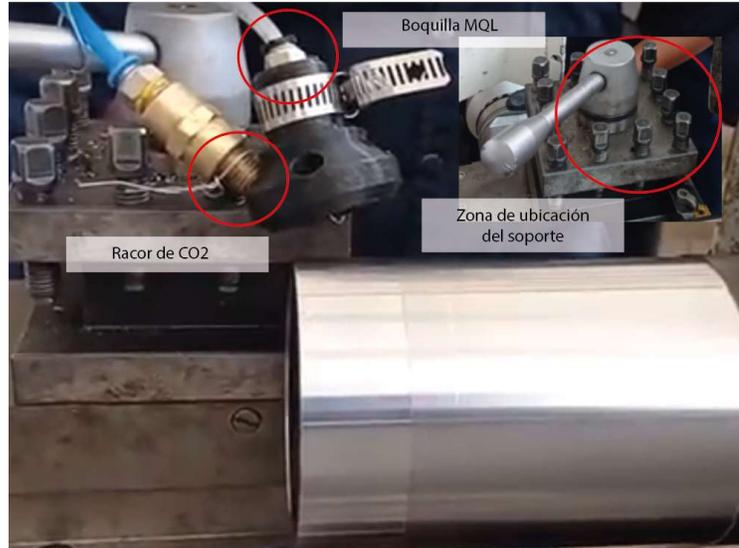


Fig. 45 Posicionamiento del soporte en el torno

En la figura 45 se presenta la zona de ubicación del soporte, que se efectúa sobre la herramienta de corte con la finalidad de que el fluido híbrido de lubricación se dirija a la zona de corte, en el soporte se coloca el racor de CO<sub>2</sub> que contiene el fluido criogénico, es decir, la mezcla de CO<sub>2</sub> gaseoso y líquido, este elemento cuenta con rosca; en la parte central se ubica la boquilla del sistema MQL.

Para complementar el sistema de lubricación híbrida, es necesaria la conexión del sistema MQL. En la figura 46 se muestran las partes del sistema.

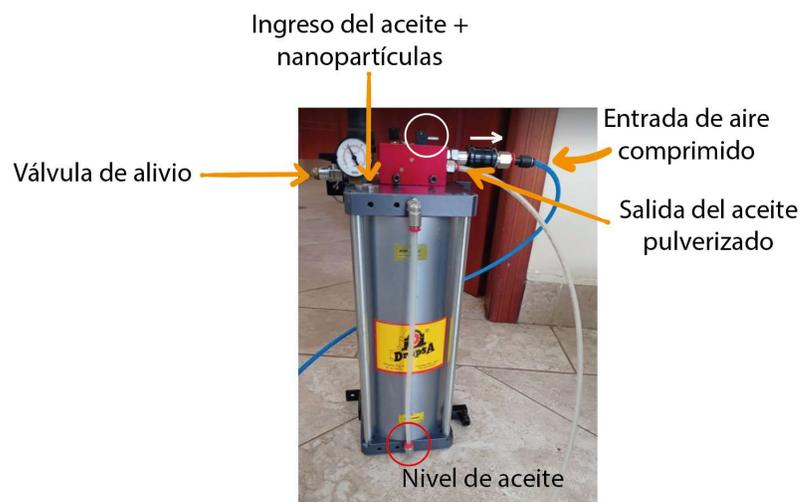
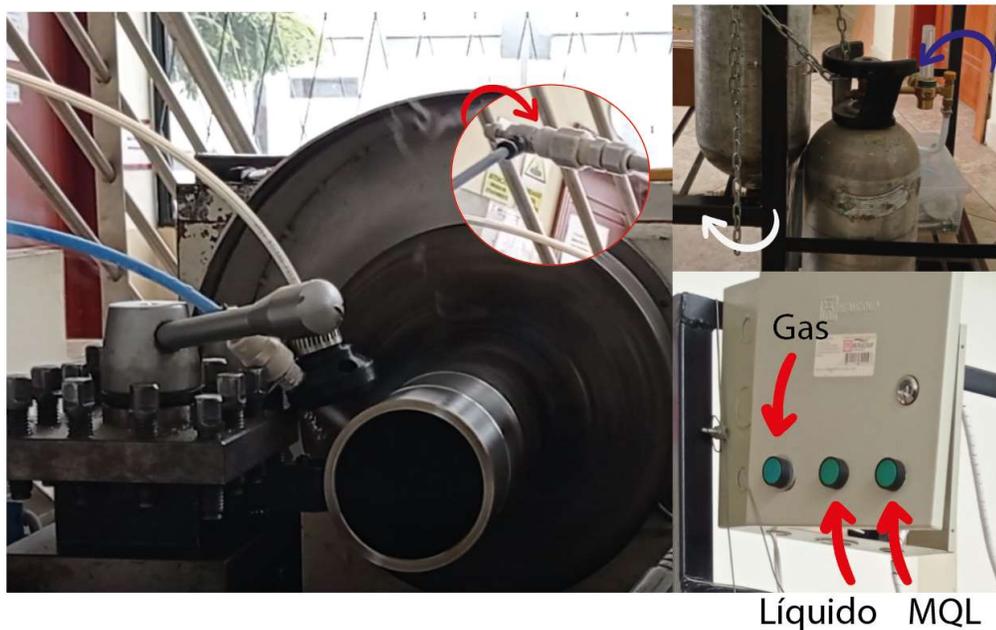


Fig. 46 Partes del sistema MQL

Para habilitar el sistema MQL se debe colocar el aceite en la ranura de la parte superior del cilindro, el sistema debe estar previamente despresurizado, para retirar el aire del interior del cilindro se debe mover la válvula lineal en la dirección contraria a la que se muestra la flecha blanca y abrir la válvula de alivio, una vez despresurizado el sistema se remueve la tapa de la ranura superior con la ayuda de una llave hexagonal y se vierte el fluido lubricante previamente mezclado con las nanopartículas y se cierra de la misma manera. Se cierra la válvula de alivio y se da apertura al flujo de aire comprimido que ingresa a 2 bares; el flujo de 480 ml/h es constante en el caso de este dispositivo, y se acciona la válvula encerrada en el círculo de color blanco para dar paso al fluido. La boquilla conectada al otro extremo de la manguera blanca de la salida del aceite pulverizado se coloca en el soporte como se describe en la figura 45.

Para poner en funcionamiento todo el sistema se verifica la apertura de las válvulas como en la dirección que se muestra en la figura 47, y el encendido / apagado del sistema con las botoneras.



*Fig. 47 Puesta en marcha del sistema de lubricación híbrida*

#### **4.3.4. Alcances y limitaciones del sistema híbrido “plug and play” propuesto.**

El sistema de lubricación y enfriamiento híbrido “plug and play” está habilitado para su utilización en las instalaciones del laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato y cumple con las condiciones de trabajo propuestas, tales como la distribución de un fluido criogénico y la pulverización del nanofluido compuesto de aceite biodegradable y nanopartículas de TiO<sub>2</sub>. El sistema también cumple con la función de mejorar el desempeño del proceso de mecanizado en torno de tuberías API L80 con la herramienta de corte CNMG120408.

El sistema propuesto es de fácil utilización, en cumplimiento de su nombre “plug and play” solo requiere la colocación de los cilindros, su conexión y ubicación del soporte de la boquilla y electrodos y de forma inmediata se puede dar uso del sistema para la emisión del fluido de corte para el mecanizado de cualquier material con cualquier herramienta de corte.

Otra ventaja que posee el sistema es su adaptabilidad en cualquier torno manual o semiautomático puesto que es un sistema móvil, únicamente se requiere que las instalaciones cuenten con una línea de aire comprimido con un mínimo de 2 bares para habilitar el sistema MQL y una toma a 110 V para la conexión del tablero de control.

La única limitación que tiene el sistema de lubricación y enfriamiento es la configuración de su soporte de las boquillas puesto que el diseño permite su ubicación en tornos manuales o semiautomáticos, para la ubicación del sistema en un torno CNC o centro de mecanizado se requiere de un rediseño del soporte con la finalidad de colocarlo en un lugar funcional.

La finalidad de utilizar este sistema es brindarle al operador un fluido de corte que le permita alcanzar mejores resultados en cuanto al acabado superficial, aumento de la vida útil de la herramienta de corte y trabajar en una condición segura y libre de agentes contaminantes para la piel y vías respiratorias. Otro beneficio de esto es que el torno no requiere de una limpieza profunda para remover los residuos del fluido de corte.

El sistema cuenta con una versatilidad muy amplia puesto que permite el trabajo con materiales poca maquinabilidad como es el caso del acero inoxidable AISI 304 que se

ha probado en otros trabajos investigativos, y de materiales como el API L80 que por sus aplicaciones en la industria petrolera contiene un recubrimiento externo de difícil remoción, a pesar de esto, la utilización del fluido de corte no presentó ningún inconveniente y los resultados fueron favorables en los dos casos.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

El proceso de torneado que emplea el fluido de corte híbrido compuesto por fluido criogénico y nano fluido de  $\text{TiO}_2$ , muestra un alto rendimiento en acabado superficial y vida útil de la herramienta de corte, en los procesos innovadores amigables con el medio ambiente.

En el sistema de lubricación y enfriamiento propuesto se comprobó, que el  $\text{CO}_2$  empleado como fluido criogénico trabajó a  $-62\text{ }^\circ\text{C}$  a través de un racor de 1,5 mm de diámetro que se dirige hacia la zona de corte. En el caso del sistema MQL que opera el nanofluido compuesto de aceite biodegradable Unist Coolube 2210 EP mezclado con nano partículas de  $\text{TiO}_2$ , este se distribuyó a 480 ml/h con una presión de 2 bar.

Durante el proceso de torneado con el sistema de lubricación pulverizada MQL con nano fluido y fluido criogénico, se produjeron obstrucciones por la formación de hielo en los elementos de conexión, los cuales se corrigieron mediante la simplificación del circuito de mezcla y distribución.

Con las condiciones de corte propuestas se evaluó la vida útil ( $T_c$ ) de la herramienta de corte que bajo la norma ISO 3685 el parámetro que mide ( $T_c$ ) es el desgaste en la zona B del flanco de la herramienta VB igual a 300  $\mu\text{m}$ . En los dos casos de lubricación para todos los experimentos se efectuó el mecanizado por 60 min en donde no se alcanzó el criterio de desgaste; sin embargo, se pudo obtener los puntos de medición necesarios para su evaluación.

Se pudo obtener un aumento de la vida útil de la herramienta de corte hasta en un 40% con respecto al uso de taladrina, en función de las condiciones de corte, este porcentaje variaba; en esta evaluación se determinó que la herramienta de corte podría llegar a durar hasta 539 min de mecanizado empleando el fluido de corte híbrido.

Se determinó que empleando ambos fluidos de corte se obtiene una rugosidad propia del proceso de torneado; sin embargo, con el empleo del método de lubricación y

enfriamiento híbrido se alcanzaron rugosidades Ra de 0,4  $\mu\text{m}$  lo cual implica un acabado superficial súper fino con marcas imperceptibles al tacto y a la vista.

## **5.2. Recomendaciones**

El método de lubricación y enfriamiento híbrido brindó resultados favorables por lo que se podría continuar evaluando su funcionamiento con otro tipo de materiales que presenten dificultades en el proceso de mecanizado, al igual que se puede corroborar su funcionamiento con otro tipo de herramientas de corte.

El sistema funcional de lubricación y enfriamiento híbrido puede continuar con su proceso de optimización y se recomienda implementar un sistema automático de distribución del fluido criogénico y MQL con la finalidad de proyectar su utilización en centros de mecanizado.

Otro parámetro que permitirá la utilización del sistema en procesos de fresado y torneado CNC es la adaptación del soporte de la boquilla del sistema MQL y de los racores del sistema criogénico por lo cual se recomienda evaluar un diseño más óptimo del soporte para continuar con su utilización.

En la fase de evaluación del sistema se recomienda ampliar los intervalos de medición de desgaste puesto que las herramientas de corte pueden llegar a tener una vida útil superior a los 60 minutos; en este caso, se debe considerar también el tipo de material y establecer un rango óptimo.

## BIBLIOGRAFÍA:

- [1] Ç. V. Yildirim, “Investigation of hard turning performance of eco-friendly cooling strategies: Cryogenic cooling and nanofluid based MQL,” *Tribol. Int.*, vol. 144, no. October 2019, 2020, doi: 10.1016/j.triboint.2019.106127.
- [2] C. E. H. Ventura, H. S. Chaves, J. C. Campos Rubio, A. M. Abrão, B. Denkena, and B. Breidenstein, “The influence of the cutting tool microgeometry on the machinability of hardened AISI 4140 steel,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 90, no. 9–12, pp. 2557–2565, 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9582-4.
- [3] L. R. da Silva, O. S. da Silva, F. V. dos Santos, F. J. Duarte, and G. V. Veloso, “Wear mechanisms of cutting tools in high-speed turning of Ti6Al4V alloy,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 103, no. 1–4, pp. 37–48, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03519-2.
- [4] Ç. V. Yildirim, T. Kivak, M. Sarikaya, and Ş. Şirin, “Evaluation of tool wear, surface roughness/topography and chip morphology when machining of Ni-based alloy 625 under MQL, cryogenic cooling and CryoMQL,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 2079–2092, 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.12.069.
- [5] H. Shane, “Economical and Ecological,” *J. Manuf. Sci. Eng.*, pp. 331–338, 2001.
- [6] K. H. Park, M. A. Suhaimi, G. D. Yang, D. Y. Lee, S. W. Lee, and P. Kwon, “Milling of titanium alloy with cryogenic cooling and minimum quantity lubrication (MQL),” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 18, no. 1, pp. 5–14, 2017, doi: 10.1007/s12541-017-0001-z.
- [7] S. Hatefi and K. Abou-El-Hossein, “Review of non-conventional technologies for assisting ultra-precision single-point diamond turning,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-06240-7.
- [8] D. Núñez, B. Núñez, H. Vaca, and M. Ureña, “Influencia del sistema de mínima cantidad de lubricante (MQL) en la vida de las herramientas de corte de metal duro en el fresado del acero AISI 1018,” *Enfoque UTE*, pp. 44–55, 2017.

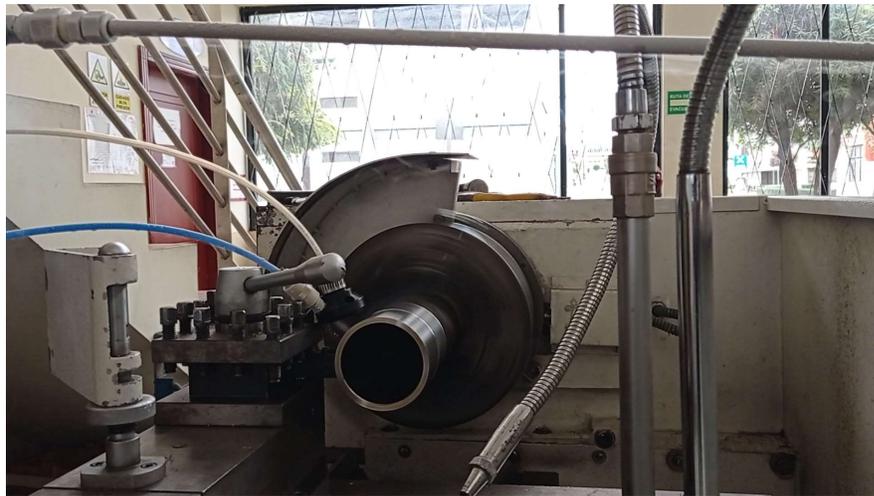
- [9] S. Cordes, F. Hübner, and T. Schaarschmidt, “Next generation high performance cutting by use of carbon dioxide as cryogenics,” *Procedia CIRP*, pp. 401 – 405, 2014.
- [10] S. Tirelli, E. Chiappini, M. Strano, M. Monno, and Q. Semeraro, “Economical Comparison of Cryogenic Vs. Traditional Turning of Ti-6Al-,” *Key Eng. Mater.*, pp. 1204–1210, 2015.
- [11] M. Jamil *et al.*, “Effects of hybrid Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CNT nanofluids and cryogenic cooling on machining of Ti-6Al-4V,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 102, no. 9–12, pp. 3895–3909, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03485-9.
- [12] K. V. B. S. Kalyan and S. K. Choudhury, “Investigation of tool wear and cutting force in cryogenic machining using design of experiments,” *J. Mater. Process. Technol.*, pp. 95–101, 2008.
- [13] Z. Said *et al.*, “A comprehensive review on minimum quantity lubrication (MQL) in machining processes using nano-cutting fluids,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 105, no. 5–6, pp. 2057–2086, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04382-x.
- [14] O. Pereira, A. Rodríguez, J. Barreiro, A. I. Fernández-Abia, and L. N. L. de Lacalle, “Nozzle design for combined use of MQL and cryogenic gas in machining,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf. - Green Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 87–95, 2017, doi: 10.1007/s40684-017-0012-3.
- [15] F. Pušavec and J. Kopač, “Sustainability Assessment: Cryogenic Machining,” *Strojniški Vestn. - J. Mech. Eng.*, pp. 637–647, 2010.
- [16] M. Jamil, A. M. Khan, N. He, L. Li, A. Iqbal, and M. Mia, “Evaluation of machinability and economic performance in cryogenic-assisted hard turning of  $\alpha$ - $\beta$  titanium: a step towards sustainable manufacturing,” *Mach. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 6, pp. 1022–1046, 2019, doi: 10.1080/10910344.2019.1652312.
- [17] R. L. Grima, “NTP 317: Fluidos de corte: criterios de control de riesgos higiénicos,” p. 7, 1999.

- [18] Sandvik, “CNMG 12 04 08-MF 2025,” 2020. .
- [19] Sandvik, “Al filo de la técnica,” 2020. .
- [20] L. Mayorga and D. Carranza, “Evaluación del desgaste de las herramientas de corte y acabado superficial en el torneado del acero inoxidable AISI 304 mediante lubricación híbrida CO<sub>2</sub> + Nano TiO<sub>2</sub>,” *Univ. Técnica Ambato*, p. 130, 2020.
- [21] Unist, “Coolube 2210EP,” 2020. .
- [22] C. P. Betancur, V. Hernández Montes, and R. Buitrago Sierra, “Nanopartículas para materiales antibacterianos y aplicaciones del dióxido de titanio,” *Rev. Cuba. Investig. Biomed.*, vol. 35, no. 4, pp. 366–381, 2016.
- [23] ISO, “ISO 3685: Tool - life testing with single - point turning tools.” Geneve, 1993.
- [24] ISO, “ISO 4287: Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters.” Geneve, 1999.
- [25] G. Heredia, “Tabla de distribución de T de Student,” 2016.

## ANEXOS



*Anexo 1 Proceso de mecanizado con fluido de corte: taladrina*



*Anexo 2 Proceso de mecanizado con fluido de corte: híbrido compuesto de fluido criogénico y nanofluido pulverizado*



*Anexo 3 Medición de la Rugosidad Ra y Rz con el rugosímetro Mitutoyo SJ10*



*Anexo 4 Evaluación del desgaste de la herramienta de corte mediante el uso de microscopía de barrido SEM*



*Anexo 5 Sistema de lubricación y enfriamiento híbrido compuesto de fluido criogénico de CO<sub>2</sub> y nano fluido pulverizado MQL*