



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TRABAJO EXPERIMENTAL PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

TEMA:

**“ESTUDIO DE ACEITES DE CORTE ALTERNATIVOS PARA PROCESOS DE
MECANIZADO CRIOGÉNICO”**

AUTOR: Patricio Hernán Cajas Lema

TUTOR: Ing. Diego Fernando Núñez Núñez M.Sc.

AMBATO – ECUADOR

Febrero - 2024

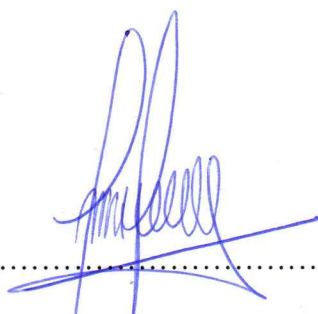
APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo Experimental, previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, con el tema: **“ESTUDIO DE ACEITES DE CORTE ALTERNATIVOS PARA PROCESOS DE MECANIZADO CRIOGÉNICO”**, elaborado por el Sr. Patricio Hernan Cajas Lema portador de la cédula de ciudadanía: CI. 1804515631, estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

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

Ambato, febrero 2024



.....
Ing. Diego Fernando Núñez Núñez M.Sc

TUTOR

AUTORIA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Patricio Hernán Cajas Lema con C.I: 1804515631 declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente trabajo experimental con el tema: **“ESTUDIO DE ACEITES DE CORTE ALTERNATIVOS PARA PROCESOS DE MECANIZADO CRIOGÉNICO”**, así como también tablas, criterios, ideas conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del proyecto, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo

Ambato, febrero 2024



Patricio Hernán Cajas Lema

C.I. 1804515631

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga uso de este Trabajo Experimental o parte de él como un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Trabajo de Investigación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad Técnica de Ambato, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, febrero 2024



Patricio Hernán Cajas Lema

C.I. 1804515631

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del tribunal de grado aprueban el informe del Trabajo Experimental realizado por el estudiante Patricio Hernán Cajas Lema de la Carrera de Ingeniería Mecánica bajo el tema: **“ESTUDIO DE ACEITES DE CORTE ALTERNATIVOS PARA PROCESOS DE MECANIZADO CRIOGÉNICO”**.

Ambato, febrero 2024

Para constancia firman:

Ing. Carlos Mauricio Carrillo Rosero, Mg.

MIEMBRO CALIFICADOR

Ing. Oscar Iván Analuiza Maiza, Mg.

MIEMBRO CALIFICADOR

DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo se lo dedico a mis padres Vicente quien con su carácter y sabiduría ha sabido compartir conmigo sus aprendizajes e inculcarme valores como la perseverancia, el respeto y la responsabilidad en mi vida laboral y personal, a mi madre Olga le doy gracias por cuidarme, y darme las fuerzas necesarias cuando pensé que todo estaba perdido, pero ella con su apoyo como madre y abuela ha sabido abrir sus brazos, su corazón y acogerme para ser mi apoyo y fortaleza para culminar con mis estudios y hacer realidad este logro tan anhelado por mis padres, esposa, hijo y familiares

A mi hermana Cecilia quien con sus consejos y ayuda incondicional ha sabido guiarme en los momentos más difíciles, gracias por tu sacrificio inagotable e incansable al ser como mi segunda madre, quiero que sepas que me siento muy afortunado y bendecido por ser tu hermano, aunque nunca me sentí como un hermano sino como tu hijo Dios le pague por todo hermana y por ser quien está pendiente de mí y de mis logros, toda esta felicidad y dicha de poderme graduar como Ingeniero Mecánico te lo debo a ti.

A mi amada esposa por ser esa persona incondicional que a pesar de las dificultades nunca me dejo solo cuando decaía, gracias por ser como eres y empujarme a seguir adelante con tus consejos, apoyo y amor incansable por tu familia, a mi hijo Mateo ya que formas una parte muy importante en mi vida y además eres el motor que me impulsa a seguir trabajando y dando lo mejor de mi como persona y profesional.

Finalmente, a toda mi familia, docentes y amigos que me acompañaron a lo largo de este camino que es el inicio de varios logros que tengo como metas alcanzar.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme sabiduría, fortaleza, salud y por haberme guiado y estar conmigo en todo momento a lo largo de mi vida, así como en esta etapa muy importante que fue la de mis estudios.

A mis padres por todo el esfuerzo que hicieron todos estos años, a mi hermana que jamás dudo de mí y me brindo toda su confianza, a mi esposa e hijo que cada día me impulsaban a continuar pese a las adversidades que se presentaban.

A quien compartió sus conocimientos, mi tutor Ing. Diego Núñez Mg. Agradezco infinitamente por su apoyo y guía que hicieron posible la culminación del proyecto de titulación.

A mi alma mater Universidad Técnica de Ambato, a la facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, a la carrera de Ingeniería Mecánica y a todos los docentes que la conforman, que con su profesionalismo me inculcaron conocimientos sólidos durante toda la carrera y que formaron un profesional de calidad.

Finalmente, a todos mis amigos, con quienes compartí una gran etapa de mi vida, por los esfuerzos grandes que tuvimos que hacer para poder concluir con todas las tareas encomendadas por nuestros docentes.

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 FIGURAS	xii
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
RESUMEN EJECUTIVO	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO I	1
ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	5
1.2.1. Objetivo General	5
1.2.2. Objetivos Específicos	5
1.3. Marco Teórico	5
1.3.1. Tipos de fluido de corte	5
1.3.1.1. Aceites directos	6
1.3.1.2. Emulsiones	6
1.3.1.3. Semisintéticos	6
1.3.1.4. Sintéticos	7
1.3.2. Técnicas de enfriamiento para procesos de mecanizado	7
1.3.2.1. Enfriamiento por inundación	7
1.3.2.2. Mecanizado en seco	8

1.3.2.3.	MQL (Cantidad mínima de lubricante)	9
1.3.2.4.	Enfriamiento criogénico	11
1.3.2.5.	Nano MQL (Cantidad mínima de lubricante)	12
1.3.2.5.1.	Fluidos de corte a base aceites vegetales.....	13
1.3.3.	Proceso de torneado.....	15
1.3.3.1.	Operaciones en el proceso de torneado	15
CAPÍTULO II		17
METODOLOGÍA		17
2.1.	Materiales	17
2.2.	Probetas de acero Inoxidable AISI 304.....	17
2.3.	Medidas de las probetas.....	17
2.4.	Insertos de torneado rómbicos.....	18
2.5.	Aceites vegetales	21
2.6.	Aceite de girasol	21
2.7.	Aceite de almendra	21
2.8.	Aceite de oliva.....	21
2.9.	Aceite SAE 20W50	22
2.10.	CO2 Criogénico.....	22
2.11.	MQL	23
2.12.	Normativa para la evaluación de la rugosidad	24
2.13.	Tipo de investigación	24
2.14.	Exploratoria	24
2.15.	Investigación descriptiva	25
2.16.	Investigación bibliográfica	25
2.14.	Operacionalización de variables de la hipótesis.....	25
2.14.1.	Variable Independiente:.....	25
2.14.2.	Variable Dependiente	25

2.15.	Velocidad de corte y avance de la herramienta	26
2.16.	Velocidad de husillo	26
2.17.	Velocidad de avance lineal	26
2.18.	Diseño experimental	27
2.19.	Factores:	27
2.20.	Respuesta	28
2.21.	Matriz de diseño Taguchi	28
2.22.	Diagrama de flujo del proceso.....	30
CAPÍTULO III		31
RESULTADOS.....		31
3.1.	Calidad superficial medida MQL y MQL con fluido criogénico CO2 .	31
3.1.1.	Aceite SAE-20W50.....	31
3.1.2.	Aceite de girasol	35
3.1.3.	Aceite de oliva.....	39
3.2.	Calidad superficial medida MQL y MQL con fluido criogénico CO2 + Nanopartículas de dióxido de Titanio.	43
3.2.1.	Aceite SAE-20W50	44
3.2.2.	Aceite de girasol	45
3.2.3.	Aceite de Oliva	46
3.3.	Calidad superficial evaluada con fluido de corte convencional o Taladrina.	47
3.4.	Comparación general de resultados.....	48
3.5.	Propiedades físicas de los aceites utilizados como fluido de corte.	52
3.6.	Verificación de la hipótesis.	53
3.6.1.	Modelo T-Student.....	53
3.6.2.	Hipótesis	54
3.6.3.	Variable dependiente	54

3.6.4.	Variable independiente	54
3.6.5.	Hipótesis nula H_0	54
3.6.6.	Hipótesis alterna H_a	54
3.6.7.	Modelo matemático de verificación de hipótesis	55
3.6.8.	Nivel de significancia	55
3.6.9.	Grados de libertad.....	55
3.6.10.	Cálculo de la distribución T comparado aceite SAE 20W50 y aceite de oliva.	56
3.6.11.	Varianza.....	57
3.6.12.	Distribución T.....	58
CAPÍTULO IV		60
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		60
4.1.	Conclusiones.....	60
4.2.	Recomendaciones	62
BIBLIOGRAFÍA.....		63
ANEXOS		68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. (a) muestra la variación de la rugosidad superficial con respecto a la velocidad de alimentación y la (b) muestra la variación de desgaste de la herramienta con respecto a la velocidad de corte.....	3
Figura 2. Vista esquemática del sistema MQL	11
Figura 3. Rayos X de dispersión de energía y microestructuras respectivas de la superficie mecanizada (a) Mecanizado en seco (b) Lubricación de cantidad mínima (MQL) con base de aceite de oliva.	14
Figura 4. Torno semiautomático FICM	15
Figura 5. Diferentes tipos de operaciones en procesos de torneado	16
Figura 6. Geometría del inserto seleccionado [3].	20
Figura 7. Sistema de mínima cantidad de lubricante.	23
Figura 8. Parámetros de corte recomendados para la herramienta CNMG 12 04 08-MF 2025.....	26
Figura 9. Diagrama de flujo del proceso de obtención de resultados	30
Figura 10. Comparación gráfica del comportamiento de la calidad superficial Ra entre los experimentos 1 y 2.....	33
Figura 11. Comparación gráfica del comportamiento de la calidad superficial Rz entre los experimentos 1 y 2.....	35
Figura 12. Comparación del comportamiento de la calidad superficial Ra entre los experimentos 3 y 4.....	37
Figura 13. Comparación del comportamiento de la calidad superficial Rz entre los experimentos 3 y 4.....	39
Figura 14. Comparación del comportamiento de la calidad superficial Ra entre los experimentos 5 y 6.....	42
Figura 15. Comparación del comportamiento de la calidad superficial Rz entre los experimentos 5 y 6.....	43
Figura 16. Comportamiento de la calidad superficial Ra de los experimentos CO ₂ +NanoTiO ₂	48
Figura 17. Gráfico de radar de la calidad superficial Ra obtenida en todos los experimentos.....	50
Figura 18. Gráfico de radar de la calidad superficial Ra obtenida en todos los experimentos.....	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de lubricante	4
Tabla 2. Insertos Rómbicos 80°	18
Tabla 3. Datos del inserto seleccionado	19
Tabla 4. Diseño experimental establecido para conocer la influencia de varios fluidos de corte en la calidad superficial	29
Tabla 5. Identificación de los experimentos, establecida en base a las combinaciones de parámetros.	29
Tabla 6. Tabla de resultados del experimento MQL-SAE-20W50.....	32
Tabla 7. Tabla de resultados del experimento MQL-SAE-20W50+CO2 Criogénico	34
Tabla 8. Tabla de resultados de la calidad superficial del experimento MQL-Aceite de Girasol	36
Tabla 9. Resultados del experimento 5 MQL-Aceite de Oliva.....	40
Tabla 10. Resultados del experimento 6 MQL-Aceite de Oliva+CO2	41
Tabla 11. Resultados de Rugosidad superficial experimento 7 MQL-SAE 20W50+CO2+Nano TiO2.....	44
Tabla 12. Resultados de Rugosidad superficial experimento 8 MQL-ACEITE DE GIRASOL+Nano TiO2.....	45
Tabla 13. Resultados de Rugosidad superficial experimento 9 MQL-ACEITE DE OLIVA+Nano TiO2.....	46
Tabla 14. Resultados de Rugosidad superficial experimento 0 Mecanizado con Taladrina.	47
Tabla 15. Resultados generales de calidad superficial obtenidos en todos los experimentos.	49
Tabla 16. Tipo de muestra de aceite y condiciones para la determinación de las propiedades de los aceites.	52
Tabla 17. Resultados obtenidos para la caracterización de los aceites de oliva y girasol.....	53
Tabla 18. Distribución T-student	56
Tabla 19. Valores estadísticos empleados en la distribución calculada.....	57
Tabla 20. Datos empleados en el cálculo de la varianza.....	58

RESUMEN EJECUTIVO

El proyecto propone estudiar aceites de corte alternativos para procesos de mecanizado criogénico con el objetivo general de mejorar la calidad superficial en operaciones de torneado.

Se utilizó literatura especializada sobre el uso de diferentes tipos de aceites como fluidos de corte, se identificaron opciones disponibles en el mercado local, determinando las propiedades físicas mediante pruebas de laboratorio, se realizaron pruebas de torneado, comparando el comportamiento de los aceites mediante la medición de la rugosidad superficial; se rechazó la hipótesis nula, confirmando que el tipo de aceite utilizado tiene un impacto significativo en el acabado superficial durante el proceso de torneado del acero AISI 304; se destacó la eficacia del sistema (MQL) y de fluido criogénico CO₂; las pruebas de laboratorio permitieron la identificación de propiedades físicas clave de los aceites, como densidades, viscosidades y puntos de inflamación, proporcionando base sólida para la selección de fluidos de corte; la comparación entre diferentes aceites reveló diferencias notables en su comportamiento térmico y tribológico, la combinación de MQL con aceite de oliva, CO₂ y nanopartículas de dióxido de titanio demostró ser altamente efectiva, no solo mejorando la calidad superficial sino también optimizando el rendimiento tribológico y prolongando la vida útil de las herramientas de corte. Estos resultados sugieren la viabilidad de esta combinación en aplicaciones específicas de mecanizado.

Como resultado, este proyecto contribuye significativamente al conocimiento sobre la selección y aplicación de fluidos de corte en procesos de mecanizado criogénico, proporcionando una base valiosa para futuras investigaciones y mejoras en la eficiencia y calidad de las operaciones de torneado.

Palabras clave: Mecanizado, aceites, refrigeración, torneado, criogénico, fluido de corte.

ABSTRACT

The project proposes to study alternative cutting oils for cryogenic machining processes with the general objective of improving surface quality in turning operations.

Specialized literature on the use of different types of oils as cutting fluids was used; options available in the local market were identified, determining the physical properties through laboratory tests; turning tests were performed, comparing the behavior of the oils by measuring surface roughness; the null hypothesis was rejected, confirming that the type of oil used has a significant impact on the surface finish during the turning process of AISI 304 steel; the effectiveness of the system (MQL) and of cryogenic fluid CO₂ was highlighted; the laboratory tests allowed the identification of key physical properties of the oils, such as densities, density and surface roughness; laboratory tests allowed the identification of key physical properties of the oils, such as densities, viscosities and flash points, providing solid basis for the selection of cutting fluids; the comparison between different oils revealed remarkable differences in their thermal and tribological behavior, the combination of MQL with olive oil, CO₂ and titanium dioxide nanoparticles proved to be highly effective, not only improving the surface quality but also optimizing the tribological performance and prolonging the cutting tool life. These results suggest the feasibility of this combination in specific machining applications.

As a result, this project contributes significantly to the knowledge on the selection and application of cutting fluids in cryogenic machining processes, providing a valuable basis for future research and improvements in the efficiency and quality of turning operations. **Keywords:** Machining, oils, cooling, turning, cryogenic, cutting fluid.

Keywords: Machining, oils, cooling, turning, cryogenic, cutting fluid.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1. Antecedentes

En la actualidad los países industrializados están obligados a realizar mejoras continuas en los procesos de fabricación, específicamente en los procesos de mecanizado ya que estos deben ser más eficientes teniendo en cuenta la competitividad que existe en este campo, ya que en países poco industrializados las reglas en cuanto a las condiciones de trabajo y leyes ambientales son escasas. [1]Es así que los fluidos de corte son muy importantes en la industria metalúrgica debido a su capacidad de reducir la fricción, la temperatura al momento de realizar el corte, mejorando sustancialmente la calidad superficial de la pieza.[2]

Según [2] en los últimos 200 años los fluidos de corte han tenido un gran impacto en la operación metalúrgica, el claro ejemplo es el de Estados Unidos quien utiliza alrededor de 100 millones de galones de petróleo al año para operaciones metalúrgicas. Con el avance tecnológico la industria manufacturera ha sido muy exigente en sus requerimientos de los fluidos de corte para obtener piezas de mejor calidad y propiedades, he ahí que se les da una mejora combinándolos entre sí; agua, aceites, aditivos químicos y emulsiones, pero este tipo de fluidos convencionales de corte tuvieron un impacto negativo en la salud de los trabajadores, ya que varios componentes químicos pueden ser inseguros y provocar más de 100 enfermedades entre ellas: cáncer, problemas en la piel, estómago y pulmones, según la NIOSH (Instituto Nacional de Ocupación, Seguridad y Salud), hay 1.2 millones de trabajadores en los Estados Unidos Estados de América expuestos a estos efectos nocivos [1], también tiene repercusiones en el medio ambiente. Debido a los problemas causados han hecho que las agencias ambientales y el gobierno impongan medidas estrictas para precautelar la seguridad de los empleados, así como la de proteger el medio ambiente.

Además, llegará el día en que los fluidos de corte a base de petróleo sean escasos, porque la materia prima de estos es finita, mientras que por otra parte los fluidos de corte a base vegetales son sostenibles a lo largo del tiempo, sin embargo, la información sobre aquello es limitada debido a su reciente aplicación en la industria manufacturera. Los aceites vegetales van evolucionando en este campo de aplicación en gran parte debido a su biodegradabilidad, también ayudan a reducir costos de tratamientos de residuos tóxicos que los aceites convencionales producen, es decir son más limpios, por ende, disminuyen los riesgos de salud de los empleados.[2]

En el mundo se ha restringido el uso el uso de TALADRINA (emulsión de: agua + aceite) en procesos de mecanizado, puesto que es el causante de más de 100 enfermedades siendo las más comunes el cáncer de piel, estómago y pulmones. Es así que en los últimos años varios métodos avanzados de lubricante-refrigerante fueron creados para ser más amigables con el ambiente (green manufacturing), una de las opciones es el mecanizado criogénico que consiste en aplicar gases criogénicos únicamente en la zona de corte del material disminuyendo la temperatura del mismo, es así que el enfriamiento criogénico se considera una innovación limpia, segura y ambiental, el nitrógeno líquido (LN_2) y dióxido de carbono (CO_2) son los líquidos criogénicos más utilizados en los últimos tiempos, un ejemplo de esta innovación se lo realizó con el LN_2 se aplicó enfriamiento criogénico al torneado Ti-6Al-4V. Los resultados en este material muestra que la temperatura de corte disminuyó debajo $500^\circ C$ y la velocidad de corte se amplió notablemente con relación al mecanizado en húmedo.[1]

Hoy se usa muchos aceites biodegradables tipo vegetales como esterres y alcoholes grasos, sin embargo, en el Ecuador no se dispone de estos aceites y se obtiene mediante importación porque aún muy pocos lo usan. El costo de 1 gal de este tipo de aceites es de aproximadamente 300 usd. fuera del país, hay que tomar en cuenta que solo se utiliza pequeñas cantidades de estos aceites ya que son usados mediante técnicas novedosas como es el MQL donde el gasto de aceite es de aproximadamente 100-1000 ml /hr de mecanizado. Surge entonces la necesidad de buscar fuentes o recursos propios para abastecer esta necesidad, en nuestro caso

puede ser el uso de aceites endémicos, propios de nuestra región o mucho más fáciles de conseguir [1].

Se ha señalado el caso del aceite de girasol con los siguientes usos: Aceite de cocina, lubricantes, sustitutos de grasa, fuentes de ácido oleico para la producción oleo química. El aceite de palma con los siguientes usos: Aceite de motor de dos tiempos, lubricantes barra de cadena, fluidos de trabajo en metal, lubricantes textiles, fluido hidráulico anti-desgaste, lubricante de máquinas de procesamiento de comida. El aceite de coco con los siguientes usos: Fluidos para la barra de la cadena, grasa, aceites de motor.[2]

Se ha evidenciado el caso del aceite de coco que al ser utilizado con la técnica MQL para MWF (Metal Working Fluid), en lugar del método por inundación proporciona una mejor absorción de calor durante el proceso de mecanizado el AISI 304, frente a la utilización de aceite mineral estándar que no ha evidenciado mejoras en el proceso, al disminuir la temperatura de mecanizado la herramienta también ha sido beneficiada provocando que ésta no se desgaste fácilmente.[3] Por otro lado, [4] ha realizado una investigación tomando como base lubricante al aceite de coco virgen mezclándolo con nano partículas de cobre (Cu), y plata (Ag) por separado, en concentraciones de 0,1%, 0,25%, 0,5% y 1% sobre la base de masas, al realizar las pruebas respectivas se comprobó que al mezclar aceite de coco con nano partículas de cobre en una concentración de 0,25%, disminuía considerablemente el coeficiente de fricción, así pues la temperatura de mecanizado como indican las curvas de la figura 1.

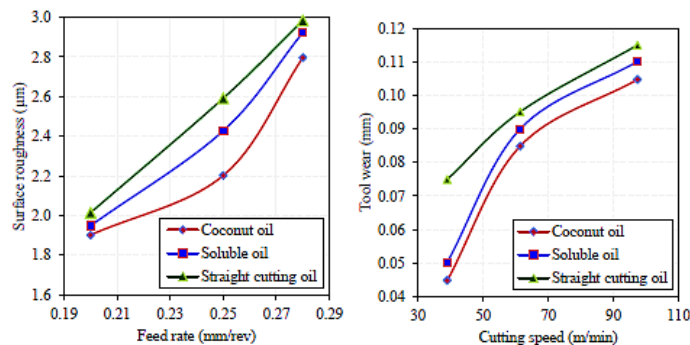


Figura 1. (a) muestra la variación de la rugosidad superficial con respecto a la velocidad de alimentación y la (b) muestra la variación de desgaste de la herramienta con respecto a la velocidad de corte.

Fuente:[2]

El aceite de palma es otra opción que investigadores la han tomado como un fluido de corte en mecanizados, es así como en [5] da una forma de utilizar el aceite de palma con agua, el mayor porcentaje de agua (90%) de aceite (10%) en la formulación de corte emulsión de aceite vegetal en agua hace que sea posible tener una mejor conductividad térmica y propiedades favorables al medio ambiente.

En otra investigación se encontró que MQLSE y MQLPO dieron un rendimiento comparable con las condiciones de inundación. Además, MQLPO superó MQLSE en las fuerzas de corte, la temperatura, la potencia y específico de energía de corte. Esto muestra que el aceite de palma se puede utilizar como una alternativa viable a éster sintético para MQL lubricante ya que presenta mejores características como se muestra en la tabla 1.[6]

Tabla 1. Características de lubricante

	Synthetic ester	Palm oil
Density (g/cm³)	0.95	0.91
Viscosity at 40 °C (mm²/s)	19	40
Viscosity index	137	190

Fuente:[6]

El aceite de girasol sería otra buena opción ya que en investigaciones se ha comprobado la eficacia de nano fluidos a base de aceite vegetal en mejorar el mecanismo de eliminación de material, es así como el aceite de girasol ha demostrado ser un buen lubricante y refrigerante.[7] Se ha realizado una investigación utilizando diferentes tipos de aceites como refrigerantes entre ellos aceite de girasol y aceite de palma, demostrando que el aceite de palme presenta mejores características de lubricación y refrigeración sobre los otros aceites ensayados, como los son el aceite de soja, maíz, maní, girasol, palma, de ricino y canola.[8] Otra alternativa utilizada como aceite lubricante en procesos de mecanizado es el aceite de motor que ya en la práctica presenta un mejor acabado superficial de la pieza mecanizada, pues según trabajadores, que por su experiencia rudimentaria utilizan este tipo de aceites cuando desean tener un mejor acabado en sus piezas, por ejemplo utilizan el SAE 10W30, SAE 20W40, entre otros.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Estudiar aceites de corte alternativos para procesos de mecanizado criogénico.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Investigar en fuentes bibliográficas especializadas el uso de diferentes tipos de aceite como fluidos de corte.
- Identificar los diferentes tipos de aceite disponibles en el mercado local que pueda ser usados como fluidos de corte.
- Realizar pruebas de laboratorio para determinar las propiedades físicas de los aceites utilizados como fluido de corte.
- Realizar pruebas de torneado con los diferentes aceites utilizados como fluido de corte combinando diferentes métodos de refrigeración/lubricación.
- Comparar el comportamiento de los aceites utilizados como fluido de corte en procesos de mecanizado mediante la medición de la rugosidad superficial.

1.3. Marco Teórico

1.3.1. Tipos de fluido de corte

En los procesos de mecanizado es muy importante conocer con que tipos de fluido de corte se trabajara y más aún cuál de ellos brindará los resultados deseados por el usuario, a continuación, se mencionaran los principales fluidos de corte convencionales que difieren uno del otros con respecto a sus propiedades termo físicas, campo de aplicación y métodos para tratarlos.

1.3.1.1. Aceites directos

Aceites de origen mineral (aceite de corte puro) o aceites vegetales (biodegradables), utilizados mayormente en operaciones donde se requiere lubricación, sin embargo, esta propiedad de ser excelentes lubricantes no es suficiente, puesto que sus capacidades de transferencia de calor son muy bajas. El aceite mineral es altamente inflamable, además su eficiencia en operaciones de alta velocidad de corte baja significativamente y su costo es relativamente alto.[9] Los aceites vegetales a más de no ser tóxicos son biodegradables (amigables con el medio ambiente) y presentan gran eficiencia en el rendimiento de varias aplicaciones, según [10] manifiesta que el uso de aceite vegetal en MQL ha mostrado resultados satisfactorios.

1.3.1.2. Emulsiones

Son una mezcla de aceite y agua, tienen una mayor capacidad de enfriamiento que el aceite puro y proporciona protección contra la oxidación. Estos tipos de fluidos de corte a base de agua son adecuados para torneado, fresado y rectificado debido al uso de nuevos materiales de herramienta de corte como metales también reducirán el efecto del calor generado en el desgaste de la herramienta de corte.[9] La investigación de [11] sobre la maquinabilidad de una aleación Ti-48Al- 2Cr-2Nb. Donde se aplicaron volúmenes de líquido de corte bajo (agua y emulsión) a la zona de corte en forma de una niebla de gotas medida con precisión y encontraron que la vida de la herramienta con la niebla de emulsión es mejor que los de MQL con aceite vegetal.

1.3.1.3. Semisintéticos

El rendimiento del semisintético no es muy diferente a las emulsiones. Sin embargo, su composición es diferente ya que el 30% o menos de la concentración total, contiene material inorgánico u otros compuestos solubles en agua. La adición de aceite emulsionado en el fluido de corte sintético resulta en fluidos semisintéticos que tienen propiedades combinadas. También se caracteriza por un mejor

mantenimiento que el aceite soluble o emulsión, pero cuando se expone a otros líquidos de la máquina puede causar riesgo de dermatitis a los trabajadores [9],[11].

1.3.1.4. Sintéticos

Es un líquido químico que contiene material inorgánico u otro producto químico que son solubles en gran cantidad de agua y ofrecen un rendimiento de refrigeración superior.[9] En cambio [12] denota que el alto uso de fluidos de corte sintéticos conduce al problema de la desechabilidad del lubricante sintético usado debido a la naturaleza tóxica del lubricante y los problemas que estos incurren.

1.3.2. Técnicas de enfriamiento para procesos de mecanizado

Para reducir el calor durante los procesos de mecanizado se han creado técnicas para el enfriamiento de piezas que están siendo mecanizadas, a continuación, se explicaran algunas técnicas.

1.3.2.1. Enfriamiento por inundación

El enfriamiento por inundación o enfriamiento húmedo, es una técnica utilizada tradicionalmente por industrias de mecanizado en la que la emulsión convencional (mezcla estabilizada de aceite y agua) va dirigida a la zona activa o zona de corte mediante un chorro continuo de esta mezcla, con el objetivo de enfriar, lubricar y eliminar las virutas producidas durante el mecanizado.[9] Es refrigerante ya que quita el calor de la zona de corte por la transferencia de calor que se da en ese momento, además es lubricante porque reduce la fricción entre las interfaces viruta/herramienta y herramienta/pieza de trabajo, es así que favorece e la reducción de temperatura de la zona de corte, el desgaste de la herramienta, las fuerzas de corte, fricción entre las interfaces viruta/herramienta y herramienta/pieza de trabajo, mejorando así el acabado superficial y la maquinabilidad general. Dando como resultado una superficie con menor rugosidad, así como un menor desgaste de la herramienta.[13]

Dentro de las desventajas de este método están, que a una mayor velocidad de corte la eficacia baja significativamente, los costos son elevados, no son biodegradables, tienen un gran impacto ambiental, causan efectos adversos al operario, y son muy difíciles de eliminar. Mientras que [14], [15], nos indican que causan los siguientes efectos ambientales y económicos:

- Dentro del fluido de corte existe un crecimiento bacteriológico, que produce peligros biológicos para la salud del operario y para la ecología cercana.
- La adherencia de partículas de aceite con la viruta requiere el proceso de reciclabilidad, lo que aumenta la demanda de energía.
- Cuando la temperatura se incrementa se produce la disociación de partículas de aceite lo que provoca la formación de gases nocivos, provocando contaminación en el aire.
- Se necesita de un gran espacio con energía para circular, reciclar y almacenar el fluido de corte, aumentando el coste de mecanizado.

Tomando en cuenta lo antes mencionado varios investigadores han creado nuevas técnicas de enfriamiento que procuran resolver estos inconvenientes que presenta el enfriamiento por inundación.

1.3.2.2. Mecanizado en seco

El mecanizado en seco o también llamado mecanizado sin fluido de corte, debido a que en un proceso en el que no interviene ningún tipo de fluido de corte/refrigerante, utilizado comúnmente en el torneado en seco para aceros endurecidos (templados) mecanizándolo con herramientas de nitruro de boro cúbico policristalino y herramientas cerámicas.[9] El mecanizado en seco se relaciona con unas elevadas temperaturas al momento de realizar el corte, así como, un desfavorable desgaste de las herramientas de corte (plaquitas) y la generación de una superficie mecanizada irregular además del quemado y la adherencia de la viruta tanto en la superficie de desprendimiento como en la cara lateral del inserto [16], estos fenómenos se producen debido a la alta fricción entre la virutas y la herramienta de corte, y la herramienta de corte con la pieza de trabajo, pues el calor

generado no se disipa rápidamente por su baja conductividad térmica concentrándose así la mayor parte del calor generado en la zona de corte, lo que provoca un severo desgaste tanto en la herramienta de corte como en las fuerzas de corte.[13]

Mientras que[14] revela que aproximadamente 600 millones de galones de fluido de corte de metales ha sido consumido por industrias manufactureras y que el 54% de esta cantidad fueron utilizadas por industrias de mecanizado, y que adicionalmente alrededor del 16% del costo total en los procesos de fabricación se compone únicamente del refrigerante y lubricante. Tomando en cuenta estos datos se puede considerar que el mecanizado seco es la tecnología más barata y limpia para mecanizar de no ser por las desventajas antes mencionadas [15]. Por otro lado, [17] menciona que a más de existir una reducción de los costes de producción y así como de los riesgos ecológicos, se requieren más gastos para la implementación de mejores materiales de herramientas, geometrías o recubrimientos de herramientas para compensar los efectos que causa el no utilizar fluidos de corte, sigue siendo la mejor alternativa si se quiere reducir costes de producción.

1.3.2.3. MQL (Cantidad mínima de lubricante)

El MQL o mecanizado casi seco (NDM) o micro lubricación, también conocido como fluido de corte en mínima cantidad (MQCF), es una solución que reducirá los daños ambientales y mejorar así el rendimiento del mecanizado [18], ya que protege la vida útil de la herramienta en procesos de torneado[19]. Este sistema utiliza una pequeña cantidad de lubricante en la zona de mecanizado que es aproximadamente 100 veces menor que el sistema de lubricación tradicional [20] por lo que se dice que es una alternativa del mecanizado del futuro[21].

Por otro lado, se dice que este sistema fue desarrollado para fusionar las ventajas de corte en seco con el de inundación[9], que además de reducir el impacto ambiental disminuye el riesgo de contraer enfermedades laborales entre los trabajadores que están inmersos en estas tareas[22], ya que con este sistema se reduce el consumo de fluido de corte en el mecanizado y el uso de aceite de base vegetal como sustitutivo de aceites a base de petróleo o los lubricantes sintéticos

(TALADRINA) hacen que los procesos sean más amigables mejorando así su sostenibilidad [23].

El rendimiento del mecanizado MQL depende esencialmente de sus parámetros, como el tipo de aceite a utilizar, el caudal con que se va a manejar el aceite, la distancia de la punta de la boquilla, la presión del aire, diámetro de la boquilla, entre otras [15]. Algunos investigadores dan ciertos valores a algunos de los parámetros antes mencionados como:

- La concentración de las emulsiones oleosas es de 3% a 10% en agua, debido a su excelente transferencia de calor[22].
- La cantidad de fluido de corte va de (10 – 100 ml/h) [9], y según [24] esta puede ser de (6 – 100 ml/h).
- A una velocidad de 100 m/s en la zona de corte con ayuda de aire comprimido [9].
- Según [14], indica que la distancia de la punta de la boquilla superior a los 50 mm era muy ineficiente por su poca efectividad al momento de humedecer la zona de corte sin importar a que presión salga con el aire[14], mientras que [15] recomienda una distancia de la punta de la boquilla de 20 mm para poder generar la niebla.
- Para [24], la presión de aire debe estar entre (5 – 7 bar) hacia la zona de corte, y [15] da un valor exacto que es de 6 bar. Ya que el aire comprimido se utiliza como medio de transporte del aceite de corte en la zona de corte en forma de aerosol o espray [22].
- [15] menciona que la boquilla consta de una manguera flexible y que la punta de esta es de 2 mm de diámetro que es la que rocía la niebla.

Estos serían los parámetros más importantes que se tendrían que tomar en cuenta en el sistema MQL para un mejor rendimiento.

Uno de los problemas que aún no se ha podido controlar es la generación de calor excesivo al momento de mecanizar materiales como el titanio y materiales compuestos, esto se debe a la insuficiente capacidad de refrigeración del sistema

MQL, es así como a este se le considera como un método de lubricación en lugar de refrigeración [17].

Es por esta razón las investigaciones han creado nuevos métodos de refrigeración, para cada día ir mejorando en todos los procesos donde se requiera mecanizar materiales de difícil mecanizado.

Por ejemplo, en la figura 2 se muestra un sistema de refrigeración y lubricación para herramientas de corte en base a un fluido de mínima cantidad de lubricante aplicado directamente a la herramienta de corte, lo cual reduce la fricción y la temperatura en el par tribológico herramienta-pieza.

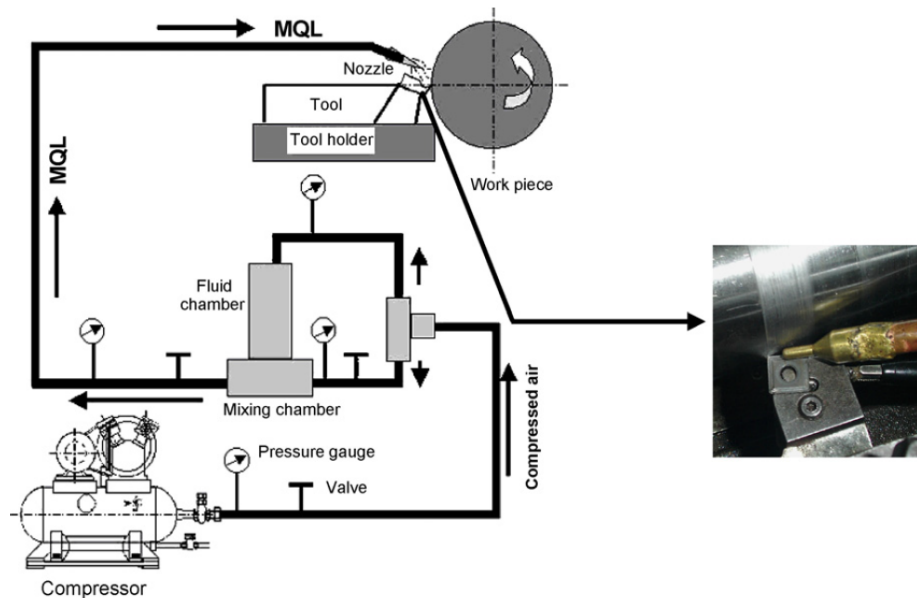


Figura 2. Vista esquemática del sistema MQL

Fuente:[25]

1.3.2.4. Enfriamiento criogénico

El enfriamiento criogénico al igual que los métodos de enfriamiento antes mencionados, su principal finalidad es ser más respetuoso con el medio ambiente, así como los que están en contacto directo en los procesos de mecanizado, previniendo así diferentes situaciones perjudiciales en la salud del operario, por ende, reducir costos de producción [2].

En la industria el mecanizado a base de enfriamiento criogénico que pueden ser a base de nitrógeno líquido o dióxido de carbono (LN₂ o LCO₂), estos se encargan de absorber de manera eficiente el calor generado en el área de corte, ya sea por evaporación o expansión, este proceso es más eficaz no quedan residuos ni en viruta, ni en la pieza de trabajo, motivo por el que se eliminaría la operación de limpieza secundaria en la pieza de trabajo y el reciclaje de la viruta sería innecesario.[14] Para poder manipular el fluido criogénico se requiere de un procedimiento de seguridad adecuado pese a que no causa ningún efecto dañino en el trabajo, por lo que es un método mayormente eficaz en el mecanizado de superaleaciones, aleaciones a base de titanio, aleaciones de acero, aleaciones a base de magnesio, entre otros, es así que reduce el desgaste de la herramienta y la integridad de la superficie del mecanizado es muy bueno, por lo tanto cumple con los tres criterios de sostenibilidad como lo son: económico, medioambiental y social.[15]

1.3.2.5. Nano MQL (Cantidad mínima de lubricante)

El mecanizado con nanofluidos (fluidos de corte combinado con partículas nanométricas (<100 μm) metálicas o no metálicas), es una técnica que implica la utilización de nanopartículas como lubricantes o refrigerantes durante el proceso de mecanizado, estas pueden ser óxido de aluminio, óxido de titanio u óxido de hierro, entre otros. Además que deben tener propiedades termoeléctricas y térmicas superiores a los fluidos convencionales, lo que hace que este tipo de procedimiento sea muy útil durante las aplicaciones en los procesos de mecanizado ya que al momento de trabajar se produce una gran cantidad de calor, disipándolo y disminuyendo el calor en la zona de corte mejorado así los procesos de mecanizado. [26]

Según [27] el rendimiento de los procesos de mecanizado utilizando MQL con nano fluidos dependen mucho de las características termo-físicas (viscosidad y conductividad térmica), tribológicas (coeficiente de fricción y desgaste) de los nano fluidos, además que estas pueden variar dependiendo de la forma, tamaño y conductividad térmica del fluido base.

Dentro de los fluidos base se mencionarán algunos de ellos indicando cuál es el impacto que éstos tienen durante los procesos de mecanizado, en varios casos se combinan los fluidos base con nanopartículas.

1.3.2.5.1. **Fluidos de corte a base aceites vegetales**

El aceite de girasol es uno de los fluidos base utilizado para combinarlos con nanopartículas y así mejorar las propiedades del fluido de corte en los diferentes procesos de mecanizado, un claro ejemplo es el que [28] propone al combinar aceite de girasol con nanopartículas de grafeno con una concentración de 0,7% mejorando así su rugosidad superficial en un 49%, un 25% en la fuerza de corte, la temperatura de corte 31%, desgaste de la herramienta en un 20% a comparación del proceso de mecanizado en seco.

Investigaciones recientes muestran que, al mezclar aceite de girasol con nanopartículas de titanato de zinc ($ZnTiO_3$), nitruro de boro (BN) y óxido de cobre (CuO) en diferentes concentraciones (de 1- 4% en peso, con tamaño de la partícula de 50nm), las propiedades como la viscosidad y la conductividad térmica mejoran hasta un 30% utilizando $ZnTiO_3$ con una concentración del 4% y hasta un 70% utilizando BN con una concentración similar a la anterior. [29]

El aceite de oliva es otra alternativa que se ha utilizado en los procesos de mecanizado, según [30] la aplicación de MQL a base de aceite de oliva tiene mejores resultados a comparación a la aplicación de mecanizado en seco, en cuanto a acabado superficial mostrando que el aceite de oliva proporciona acabados superiores como se observa en la figura 3, además que extiende la vida útil de la herramienta.

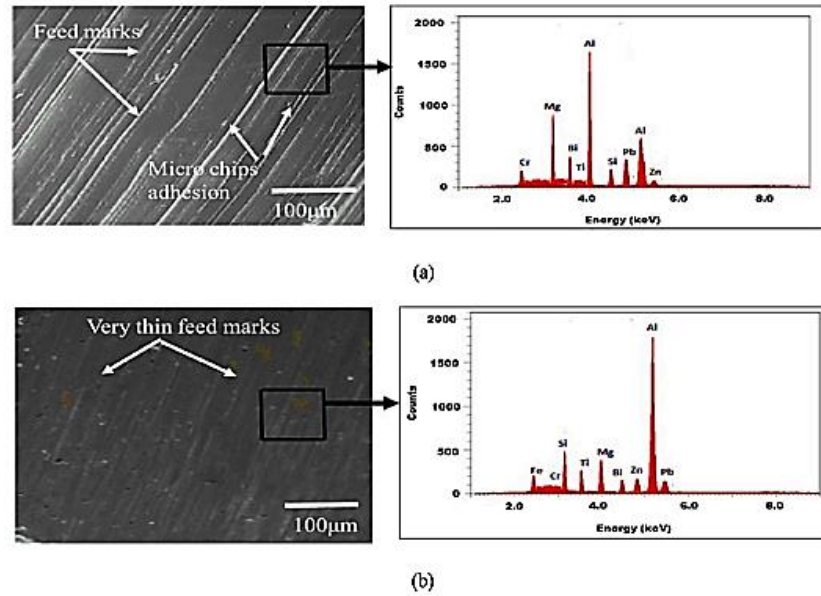


Figura 3. Rayos X de dispersión de energía y microestructuras respectivas de la superficie mecanizada (a) Mecanizado en seco (b) Lubricación de cantidad mínima (MQL) con base de aceite de oliva.

Fuente: [30]

Según la investigación que realizó [31], menciona que el aceite de almendras con MQL como fluido de corte en procesos de mecanizado del acero inoxidable AISI 420 proporciona resultados muy buenos cuando al hablar de la vida útil de la herramienta se trata, así como también de la rugosidad superficial de la pieza a mecanizar, a comparación con el mecanizado en seco, puesto que se reducen las temperaturas en el área de corte, siendo así una alternativa efectiva como fluido de corte en los diferentes procesos de mecanizado.

El aceite de palma al ser utilizado como fluido de corte presenta mejoras significativas con respecto a los aceites minerales, en cuanto a rugosidad superficial y temperatura de corte. Es así como [32] al realizar su estudio evaluó el desempeño del aceite de palma como aceite lubricante de corte mecanizando el acero AISI 1039, arrojando resultados satisfactorios así, 44% de mejora referente a la rugosidad superficial y un 12% en la temperatura de corte, datos obtenidos comparándolos con el mecanizado utilizando aceites minerales. Mostrando así que el aceite de palma al ser utilizado como fluido de corte mejora la calidad de las piezas a ser mecanizadas haciendo que el proceso de mecanizado sea eficiente.

1.3.3. Proceso de torneado

Este es un de los procesos de mecanizado más básicos que comprende arranque de viruta, donde una herramienta de corte de un solo punto se mueve en dirección paralela a su eje de rotación y la pieza a ser cortada gira, al entrar en contacto la herramienta con la pieza de trabajo, esta realiza cortes en forma de viruta eliminando así el material excedente para conseguir la forma y tamaño deseado, este proceso se puede optimizar mediante varios parámetros, entre ellos; la velocidad de corte, la velocidad de avance, la velocidad de eliminación del material y la potencia de extracción, este proceso se utiliza para obtener elementos de revolución. [33]

La máquina herramienta usada en la investigación fue un torno paralelo semiautomático que se muestra en la figura 4

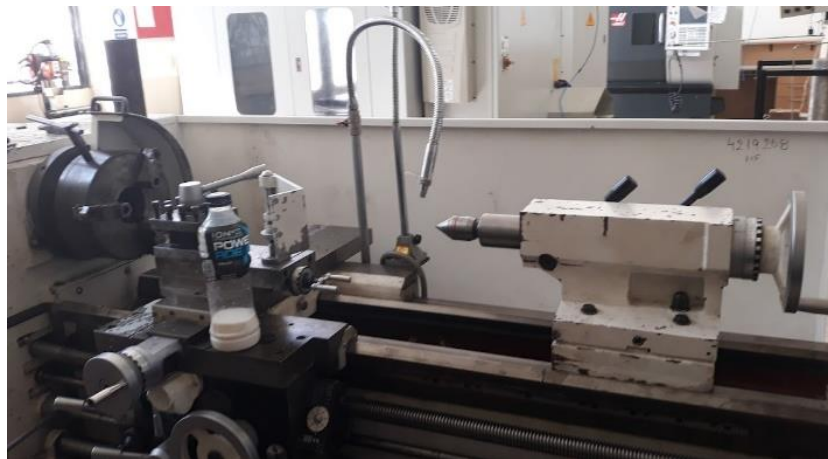


Figura 4. Torno semiautomático FICM

Fuente: Autor

1.3.3.1. Operaciones en el proceso de torneado

Durante el proceso de torneado se utilizan diversas operaciones dentro de ellas tenemos: torneado recto (cilindrado), torneado cónico, perfilado, torneado y ranurado externo, careado (refrentado), ranurado frontal, corte con una herramienta formadora, mandrinado y ranurado interno, taladrado, tronzado, roscado, moleteado, todas estas operaciones hacen posible la producción de ejes, vástagos, tornillos, chaveteros, tuercas, entre otros, pues para su formación se necesita tolerancias

ajustadas y superficies de calidad superior, cabe mencionar que al momento de la elaboración de las piezas estas deben estar centradas correctamente en el torno, en la figura 5 se muestran algunas de las operaciones más frecuentes utilizadas en el torno. [34]

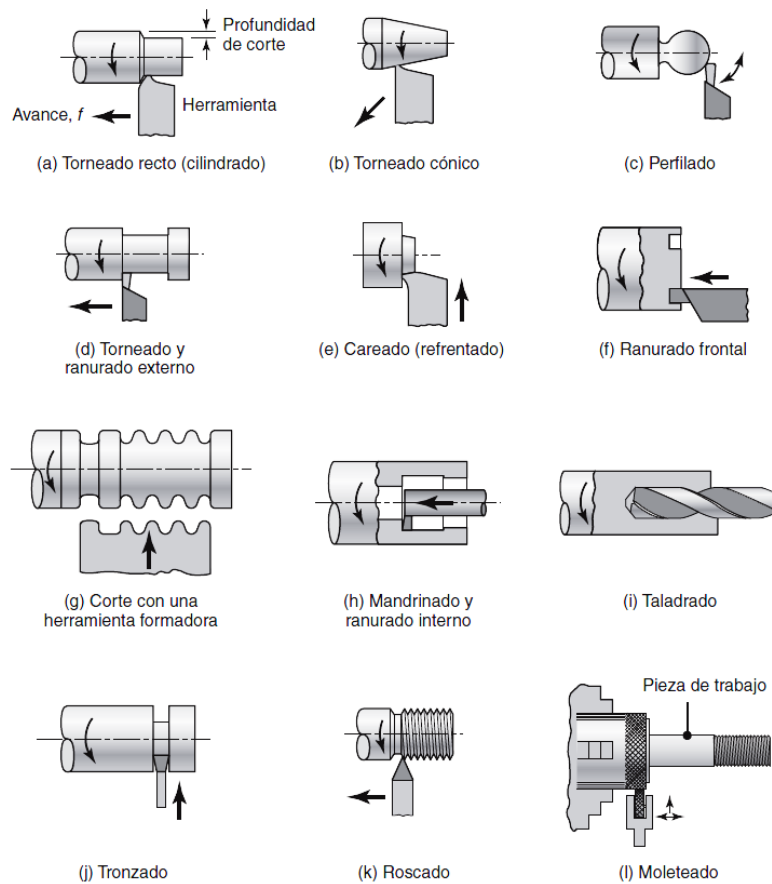


Figura 5. Diferentes tipos de operaciones en procesos de torneado

Fuente: [34]

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2.1. Materiales

Comprenden los medios físicos que desempeñan un papel esencial en la ejecución exitosa del estudio experimental y el posterior análisis de datos. Desde instrumentos de medición especializados hasta equipamiento de laboratorio, muestras y especímenes, y entornos de control, estos elementos tangibles son fundamentales para recopilar información precisa y confiable en diversas disciplinas científicas.

Además, las herramientas informáticas, equipos de registro de datos y material de laboratorio, junto con la infraestructura de laboratorio y el equipo de protección personal, contribuyen a garantizar la validez y seguridad de la investigación, convirtiéndolos en componentes ineludibles para el avance científico.

2.2. Probetas de acero Inoxidable AISI 304.

El acero inoxidable austenítico, una aleación de cromo y níquel altamente resistente a la corrosión intergranular causada por agentes químicos ambientales, es una opción idónea para procesos de embutido y mecanizado mediante arranque de viruta. En la industria, es ampliamente preferido debido a sus notables propiedades mecánicas y su destacada capacidad de resistencia frente a la acción de sustancias corrosivas. En este contexto, para llevar a cabo la presente investigación, se ha optado por un acero de la serie Böehler, como se detalla en la tabla , debido a su disponibilidad en el mercado para aplicaciones de maquinado.

2.3. Medidas de las probetas

La norma ISO 4287 no especifica las dimensiones exactas de las muestras a utilizar en el ensayo rugosidad, pero establece que las mediciones deben realizarse

luego del mecanizado. En este sentido, se llevaron a cabo 3 mediciones para evaluar la rugosidad luego de 3 pasadas.

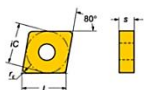
Para esta finalidad, se tomó como punto de partida un diámetro de eje de 38,1 mm y una longitud de desbaste de 100 mm, con un margen de seguridad de 20 mm. Sin embargo, debido a consideraciones relacionadas con la sujeción y la estabilidad, se diseñó una probeta de 220 mm de longitud. La idea detrás de esta decisión era comenzar el desbaste en un extremo y continuar en el otro cuando el diámetro se volviera demasiado pequeño, lo que podría hacer que la probeta fuera más susceptible a las vibraciones.

Durante el desarrollo de la investigación se evidencio que es necesario el uso de un contrapunto para contrarrestar las vibraciones causadas por el eje en voladizo.

2.4. Insertos de torneado rómbicos

El propósito de esta investigación fue dar seguimiento a investigaciones previas, y, en ese sentido, el inserto utilizado fue suministrado por el fabricante establecido, SANDVIK COROMANT. A partir de su catálogo y teniendo en cuenta la geometría de la porta insertos disponible, la dirección de la operación de torneado y el tipo de sujeción del mango, se procedió a seleccionar la forma y la serie de la plaquita, como se describe en detalle en la tabla 2.

Tabla 2. Insertos Rómbicos 80°



				P										M					
		IC	IL	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°
ISO	CNMG 12 04 04-QF	12	1/2																
	CNMG 12 04 08-QF																		
	CNMG 12 04 12-QF																		
Acabado	CNMG-QF																		
	CNMG																		
CNMG-MF*	CNMG 09 03 04-MF	09	3/8																
	CNMG 09 03 08-MF																		
	CNMG 12 04 04-MF	12	1/2																
	CNMG 12 04 08-MF																		
	CNMG 12 04 12-MF																		
	CNMG 12 04 16-MF																		

La elección de la geometría de la herramienta de corte se basó en las dimensiones de la porta insertos disponibles, y se seleccionaron las dimensiones correspondientes para el inserto directamente del catálogo, tomando como referencia las especificaciones definidas en la norma ISO 13399, la designación corresponde al código: CNMG 12 04 08-MF 2025

Las dimensiones de los insertos se presentan detalladamente en la tabla 3 y su geometría se muestra en la figura.

Tabla 3. Datos del inserto seleccionado

Tipo de operación (CTPT)	Finishing
Código de modelo de montaje de plaquita (IFS)	2
Fijación del diámetro del agujero (D1)	5,156 mm
Tamaño y forma de plaquita (CUTINT_SIZESHAPE)	CN1204
Número de filos (CEDC)	4
Diámetro de círculo inscrito (IC)	12,7 mm
Código de forma de plaquita (SC)	C
Longitud efectiva del filo (LE)	12,0959 mm
Radio de punta (RE)	0,7938 mm
Mano (HAND)	N
Calidad (GRADE)	2025
Sustrato (SUBSTRATE)	HC
Recubrimiento (COATING)	CVD TiCN+Al2O3+TiN
Grosor de plaquita (S)	4,7625 mm
Ángulo de incidencia principal (AN)	0 deg
Peso del elemento (WT)	0,009 kg
Release date (ValFrom20)	16/6/96
ID de paquete de emisión (RELEASEPACK)	03.1

La descripción "CNMG 12 04 08-MF 2025" se refiere a una plaquita de torneado que sigue un formato de identificación comúnmente utilizado en la industria

para designar herramientas de corte, en este caso, se trata de una plaquita de torneado.

CNMG: Esta parte de la designación indica el tipo de plaquita de torneado. En este caso, "CNMG" se refiere a un inserto de torneado de forma romboidal con ángulos de 80 grados. Estos insertos son conocidos por su versatilidad en aplicaciones de torneado y pueden utilizarse en una variedad de materiales.

12: El primer número se refiere al tamaño de la plaquita. En este caso, "12" indica que es un inserto de tamaño mediano.

04: El segundo número generalmente se refiere al ángulo de la punta de la plaquita o a la longitud de la arista de corte. En este caso, "04" podría indicar un ángulo específico de la punta o la longitud de la arista de corte.

08-MF: Este segmento proporciona información adicional sobre la geometría y el recubrimiento de la plaquita. "08-MF" podría indicar una geometría específica de la plaquita y un tipo de recubrimiento, lo que influirá en su rendimiento y aplicaciones recomendadas.

2025: Los últimos números indican la serie de la plaquita y pueden proporcionar información específica sobre sus características y propiedades. En este caso, "2025" podría estar relacionado con una serie de plaquitas de un fabricante particular, en la figura 6 se muestra la geometría detallada del inserto.

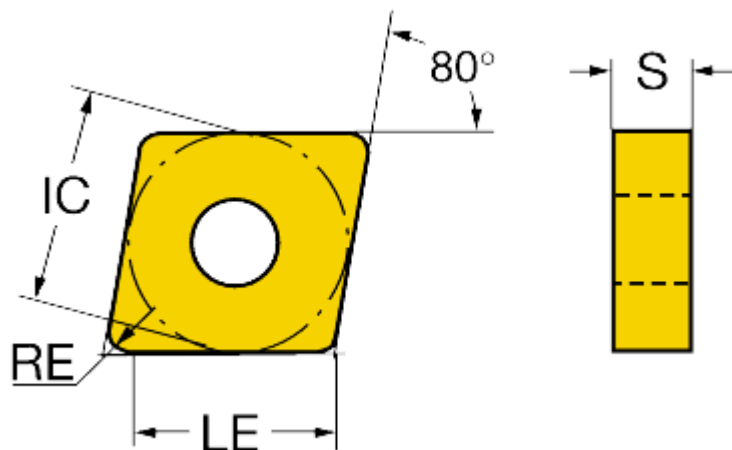


Figura 6. Geometría del inserto seleccionado [3].

2.5. Aceites vegetales

Los aceites vegetales son sustancias derivadas de plantas y semillas que se utilizan ampliamente en diversas aplicaciones culinarias, industriales y de cuidado personal. Estos aceites son conocidos por su origen natural y su amplia variedad de tipos, como aceite de oliva, aceite de soja, aceite de girasol, entre otros. Son apreciados por su versatilidad. Además, en la industria, se utilizan en la fabricación de varios productos y son abundantes en el mercado, es por ello que fueron elegidos para la presente investigación [3].

2.6. Aceite de girasol

El aceite de girasol es un lubricante que se valora por su viscosidad adecuada y su capacidad para formar una película protectora entre las superficies en contacto. Esto lo hace apropiado para aplicaciones en las que se requiere una lubricación eficaz en condiciones de carga y velocidad moderadas. Su capacidad para reducir la fricción y el desgaste en componentes mecánicos lo convierte en una elección valiosa en sistemas donde se busque minimizar la pérdida de energía debido a la fricción [4].

2.7. Aceite de almendra

El aceite de almendra se aprecia por su baja fricción y resistencia al desgaste, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren una lubricación suave y un desgaste mínimo de componentes mecánicos. Sus propiedades emolientes pueden ser valiosas en aplicaciones donde se necesite una lubricación suave y una viscosidad específica. Además, su capacidad para mantener la lubricación en condiciones de carga y temperatura moderadas lo hace útil en situaciones donde la eficiencia y la durabilidad son fundamentales [5].

2.8. Aceite de oliva

El aceite de oliva, apreciado por su alta resistencia al calor y su capacidad para adherirse a las superficies, encuentra aplicaciones para condiciones de alta

temperatura y presión. Su capacidad para mantener una lubricación eficaz en ambientes hostiles lo hace valioso en sistemas sometidos a cargas extremas y altas temperaturas. Además, su resistencia a la oxidación y la corrosión lo convierte en una opción adecuada para la protección de componentes en entornos adversos [6].

2.9. Aceite SAE 20W50

El aceite SAE 20W50 es un tipo de lubricante de motor que se utiliza comúnmente en vehículos y maquinaria pesada. Su designación "20W50" se refiere a su viscosidad en condiciones de frío y calor, lo que significa que es adecuado tanto para climas fríos como cálidos. Entre sus propiedades clave se encuentran su capacidad de mantener una viscosidad adecuada a temperaturas extremas, su capacidad para reducir la fricción y el desgaste, su resistencia a la oxidación y la formación de depósitos, su capacidad de proteger contra la corrosión y su capacidad de limpieza en este caso se utilizará como fluido de corte combinado con nanopartículas de dióxido de titanio y CO₂ líquido [8].

2.10. CO₂ Criogénico

El CO₂ criogénico, o dióxido de carbono en estado criogénico, es una forma de dióxido de carbono que se encuentra a temperaturas extremadamente bajas, generalmente por debajo de -78.5 grados Celsius (-109.3 grados Fahrenheit) a presión atmosférica. Se utiliza en una variedad de aplicaciones, como refrigeración criogénica, extinción de incendios, limpieza criogénica y en la industria alimentaria para congelar alimentos [9].

Su versatilidad radica en su capacidad para sublimarse directamente de un sólido a un gas sin dejar residuos líquidos, lo que lo hace útil en aplicaciones donde se requiere un agente de enfriamiento no tóxico y no inflamable. Además, el CO₂ criogénico desempeña un papel importante en la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero, ya que su captura y almacenamiento a largo plazo se considera una estrategia para reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera [10].

2.11. MQL

La sigla "MQL" se refiere a "Minimum Quantity Lubrication", que en español significa "Lubricación de Cantidad Mínima". Se trata de una técnica de lubricación y refrigeración utilizada en procesos de torneado y mecanizado que busca reducir el consumo de lubricantes y refrigerantes al mínimo necesario para mantener una operación eficaz [8].

El equipo utilizado para esta investigación es un sistema de lubricación mínima que opera mediante la dispersión de un aceite vegetal en la zona de corte de la herramienta y la pieza que está siendo mecanizada. Este aceite vegetal se transporta mediante una boquilla que combina el aceite con aire comprimido para lograr la lubricación deseada [5].

El equipo que se empleará pertenece a la marca Dropsa e incluye componentes como un presostato, un manómetro, una entrada de aire comprimido, un filtro y un sensor eléctrico de nivel. En la figura 7 se muestra el recipiente a presión que constituye el núcleo del sistema MQL, acompañado por su electroválvula y la manguera utilizada para conducir el aceite y el aire que generan el efecto de aerosol. El caudal del sistema se mantiene a 480 ml/h [6].



Figura 7. Sistema de mínima cantidad de lubricante.

2.12. Normativa para la evaluación de la rugosidad

La norma **ISO 4287** es un estándar internacional que establece las especificaciones y métodos para la medición de la rugosidad superficial en piezas y componentes de ingeniería. Esta norma se centra en la descripción de la rugosidad de superficie, que se refiere a las irregularidades microscópicas en la topografía de una superficie, y es un factor crucial en la fabricación y el diseño de piezas y componentes, ya que puede afectar significativamente el rendimiento y la funcionalidad [13].

Este documento aborda varios aspectos relacionados con la medición de la rugosidad superficial, incluyendo la terminología y los conceptos básicos, los instrumentos de medición (generalmente, rugosímetros), los parámetros de rugosidad y los métodos de medición. Algunos de los parámetros de rugosidad comunes definidos por esta norma incluyen la rugosidad media aritmética (R_a), la rugosidad máxima (R_z), la altura de picos (R_p), y la distancia entre picos (S_m). Estos parámetros son fundamentales para describir la textura de una superficie y evaluar su calidad [13].

2.13. Tipo de investigación

2.14.Exploratoria

El nivel de investigación exploratoria se enfoca en la obtención de una comprensión inicial y superficial de un tema, problema o fenómeno de estudio. A menudo, se utiliza cuando la información disponible es limitada o se necesita una visión general del tema. Este nivel de investigación busca identificar preguntas clave, definir conceptos y desarrollar hipótesis iniciales que servirán como base para investigaciones posteriores. A través de técnicas como entrevistas, observaciones y revisión de literatura, se busca explorar nuevas perspectivas y enfoques que puedan guiar.

2.15. Investigación descriptiva

Tiene como objetivo principal proporcionar una representación detallada y precisa de un fenómeno o población. Se centra en responder preguntas sobre quién, qué, cuándo, dónde y cómo, y busca establecer relaciones y patrones. Utiliza métodos cuantitativos y cualitativos para recopilar datos, como encuestas, cuestionarios, análisis de contenido, y otras técnicas. La investigación descriptiva es fundamental para comprender la estructura y características de un fenómeno en particular, y puede servir como base para la toma de decisiones informadas.

2.16. Investigación bibliográfica

Se basa en la revisión y análisis crítico de la literatura existente sobre un tema o problema de investigación. Su objetivo es reunir, sintetizar y evaluar la información ya publicada en libros, artículos, investigaciones previas y otras fuentes documentales. La investigación bibliográfica permite identificar brechas en el conocimiento, reconocer tendencias y perspectivas emergentes, y establecer una base sólida para definir el alcance y los objetivos de una investigación futura. Este tipo de investigación es fundamental para contextualizar un tema y garantizar que una nueva investigación esté informada por el conocimiento previo en el campo.

2.14. Operacionalización de variables de la hipótesis.

2.14.1. Variable Independiente:

Tipo de aceite de corte alternativo que se está utilizando en el proceso de mecanizado criogénico. Esta variable se manipula o selecciona de manera deliberada en el estudio para analizar su impacto en el proceso.

2.14.2. Variable Dependiente

Resultado o los resultados del proceso de mecanizado criogénico. Esto podría incluir generalmente las medidas de calidad del mecanizado principalmente la

rugosidad superficial que es una métrica que se utiliza para evaluar la efectividad del mecanizado criogénico cuando se utiliza un aceite de corte alternativo en comparación con los aceites de corte convencionales.

2.15. Velocidad de corte y avance de la herramienta

Para establecer los valores de velocidad de corte y avance de la herramienta de torneado se verificaron los datos recomendados por el fabricante, en este caso la V_c corresponde a 195 m/min y el avance a 0.1 mm/rev, en este caso se escoge el mínimo debido a que es un valor que no es controlable fácilmente en el torno manual, los parámetros recomendados por el fabricante se muestran en la figura 8 y fueron utilizados en investigaciones previas.

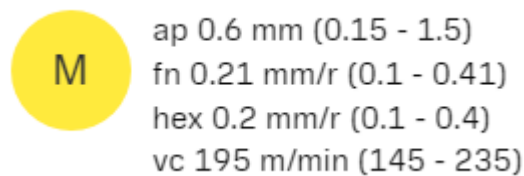


Figura 8. Parámetros de corte recomendados para la herramienta CNMG 12 04 08-MF 2025

2.16. Velocidad de husillo

Ec.1

$$n = \frac{1000 * V_c}{\pi * D}$$

$$n = \frac{1000 * (195 \frac{m}{min})}{\pi * (38.1 mm)}$$

$$n = 1629.145 rpm$$

2.17. Velocidad de avance lineal

Ec.2

$$V_f = n * f_n$$

$$Vf = 1629.145 \frac{rev}{min} * \left(0.1 \frac{mm}{rev}\right)$$

$$Vf = 162.91 \frac{mm}{min}$$

2.18. Diseño experimental

Para el diseño de los experimentos se emplea la metodología de Taguchi la cual implica identificar los factores (variables de entrada), los niveles de cada factor y las respuestas (variables de salida) que se desea medir, en este caso la respuesta es la rugosidad. En este caso, los factores son 3 son los tipos de fluido de corte, los tipos de fluido criogénico y los tipos de aditivos, como se muestra a continuación.

2.19. Factores:

a) Tipo de fluido de corte

Nivel 1: SAE-20W50

Nivel 2: Aceite de girasol

Nivel 3: Aceite de almendra

Nivel 4: Aceite de oliva

b) Tipo de fluido criogénico

Nivel 1: Sin CO2

Nivel 2: Con CO2

c) Tipo de aditivos

Nivel 1: Sin Nano TiO2

Nivel 2: Con Nano TiO2.

2.20. Respuesta

Para obtener los resultados de la investigación es necesario elegir las respuestas específicas que se desean medir en los experimentos. Por ejemplo, en investigaciones previas se ha analizado varias respuestas como es la calidad superficial y el desgaste de la herramienta de corte, en este caso se analizará únicamente la influencia de cada uno de los niveles de los factores identificados en la calidad superficial Ra y Rz de la superficie mecanizada.

2.21. Matriz de diseño Taguchi

Una vez que se han identificado los factores y las respuestas, se debe utilizar una matriz de diseño Taguchi para organizar adecuadamente el experimento. En este caso, el diseño corresponde a un L16, que implica 16 corridas de experimentación. La matriz se muestra en la tabla 4. Para obtener mejores resultados se realizaron 3 arreglos de 15 mediciones por cada corrida.

La utilización de una matriz de diseño Taguchi, en este caso de tipo L16 con 16 corridas experimentales, se revela como una estrategia fundamental para organizar eficazmente el experimento tras la identificación de factores y respuestas. La tabla 4 muestra la disposición de esta matriz, destacando su importancia en la obtención de resultados óptimos. Para maximizar la precisión de las mediciones, se llevaron a cabo tres arreglos, cada uno compuesto por 15 mediciones en cada corrida. Esta metodología contribuye a una planificación estructurada y rigurosa del experimento, permitiendo analizar de manera sistemática el impacto de los factores identificados.

Tabla 4. Diseño experimental establecido para conocer la influencia de varios fluidos de corte en la calidad superficial

Experimento N°	Vc (m/min)	Vf (mm/rev)	Método	Fluido de corte	Fluido Criogénico	Aditivo	N° de mediciones
0	195	0,1	Inundación	Taladrina	-	-	3
1	195	0,1	MQL	SAE-20W50	-	-	3
2	195	0,1	MQL	Aceite de girasol	-	-	3
3	195	0,1	MQL	Aceite de oliva	-	-	3
4	195	0,1	MQL	SAE-20W50	CO2	-	3
5	195	0,1	MQL	Aceite de girasol	CO2	-	3
6	195	0,1	MQL	Aceite de oliva	CO2	-	3
7	195	0,1	MQL	SAE-20W50	-	Nano TiO2	3
8	195	0,1	MQL	Aceite de girasol	-	Nano TiO2	3
9	195	0,1	MQL	Aceite de oliva	-	Nano TiO2	3
10	195	0,1	MQL	SAE-20W50	CO2	Nano TiO2	3
11	195	0,1	MQL	Aceite de girasol	CO2	Nano TiO2	3
12	195	0,1	MQL	Aceite de oliva	CO2	Nano TiO2	3

Luego de establecer las distintas combinaciones se estableció una codificación para identificar cada experimento, con la finalidad de distinguir los resultados obtenidos en cada uno y realizar las respectivas comparaciones. La codificación establecida para cada experimento se presenta de manera detallada en la tabla 5.

Tabla 5. Identificación de los experimentos, establecida en base a las combinaciones de parámetros.

Experimento N°	Código de identificación
0	IN-TAL
1	MQL-SAE-20W50
2	MQL-SAE-20W50-CO2
3	MQL-SAE-20W50-NANO TiO2
4	MQL-SAE-20W50-CO2-NANO TiO2
5	MQL-AG
6	MQL-AG-CO2
7	MQL-AG-NANO TiO2
8	MQL-AG-CO2-NANO TiO2
9	MQL-AOL
10	MQL-AOL-CO2
11	MQL-AOL-NANO TiO2
12	MQL-AOL-CO2-NANO TiO2

2.22. Diagrama de flujo del proceso.

En la figura 9 se presenta los pasos que se siguieron para obtener los resultados de la investigación a modo de diagrama de flujo, cada tarea se ejecutó de manera minuciosa hasta obtener los resultados de la mejor combinación de aceites y fluidos de corte.

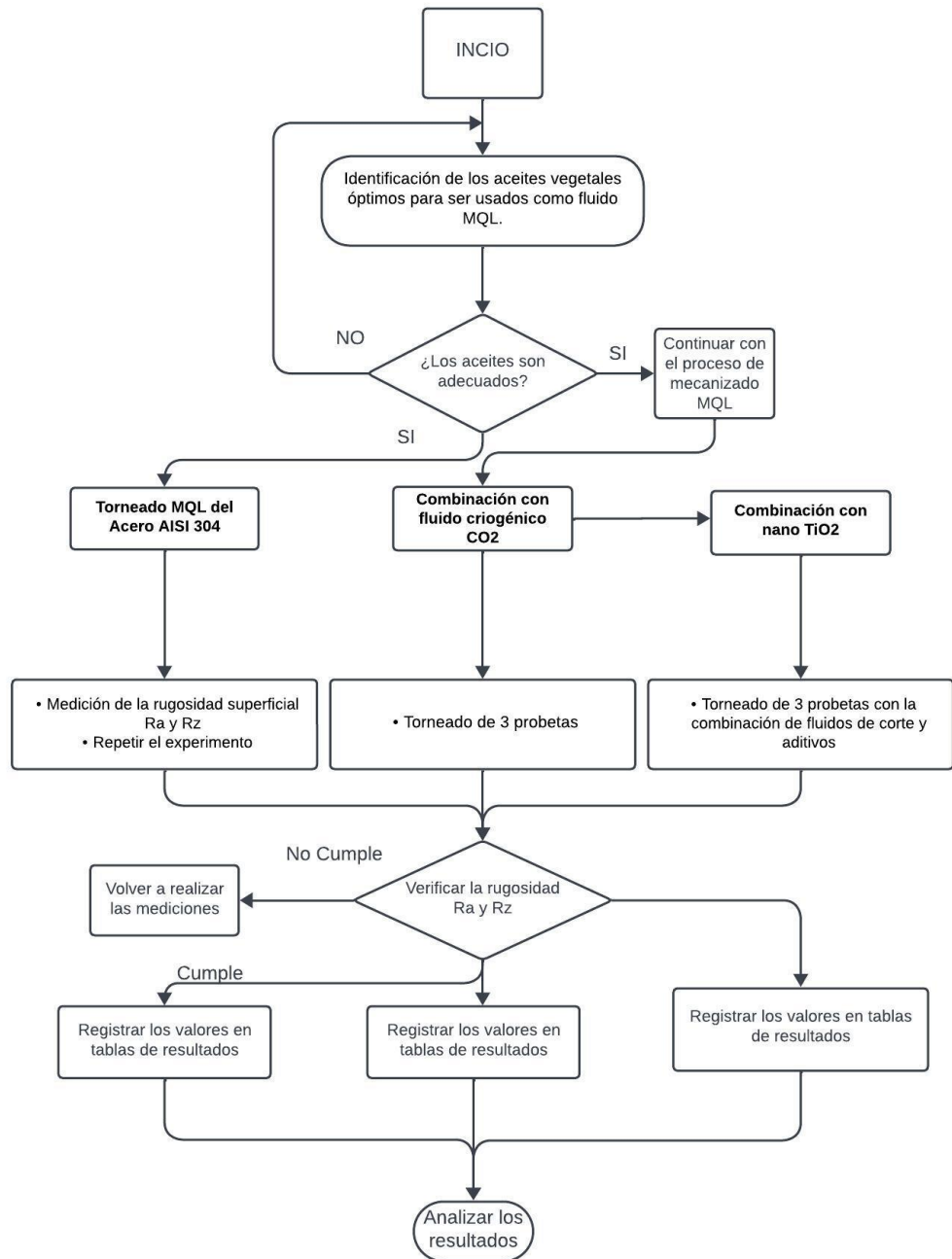


Figura 9. Diagrama de flujo del proceso de obtención de resultados

CAPÍTULO III

RESULTADOS

3.1. Calidad superficial medida MQL y MQL con fluido criogénico CO2

La calidad superficial en procesos de mecanizado es un factor crítico que afecta directamente la funcionalidad y estética de las piezas producidas. Dos enfoques innovadores que han demostrado tener una influencia significativa en la mejora de la calidad superficial son la aplicación de fluido MQL (Minimum Quantity Lubrication) y el uso de fluido criogénico CO2.

El MQL se destaca por su capacidad para reducir la fricción y el desgaste de la herramienta al aplicar una cantidad mínima de lubricante directamente en la zona de corte. Esta técnica minimiza la acumulación de calor, lo que contribuye a prevenir deformaciones y asperezas en la superficie de la pieza mecanizada. Además, al utilizar una cantidad mínima de lubricante, el MQL también tiene beneficios ambientales al reducir el consumo de fluidos.




Por otro lado, la aplicación de fluido criogénico CO2 implica el uso de dióxido de carbono en estado criogénico para enfriar la zona de corte durante el mecanizado. Este enfoque ayuda a controlar la temperatura de la herramienta y la pieza, evitando distorsiones térmicas y mejorando la calidad superficial.

3.1.1. Aceite SAE-20W50

En la tabla 6 se presentan los resultados medidos de calidad superficial para el experimento 1 que consiste en refrigeración con mínima cantidad de lubricante SAE-20W50, se presentan resultados para 3 probetas con 5 corridas cada una obteniéndose una rugosidad Ra de 0,6811 μm y Rz de 3,6635 μm , Ra consiste en la media aritmética de los valores absolutos de las desviaciones de la línea central en una longitud de muestreo, por otro lado, Rz es la diferencia entre los valores máximos y mínimos en una longitud de muestreo, con estos datos se pueden realizar

comparaciones con los diferentes métodos de refrigeración propuestos en la presente investigación.

Tabla 6. Tabla de resultados del experimento MQL-SAE-20W50

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA		 FICM				
REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL						
Datos Informativos						
Tipo de estudio	Experimental	Ítem				
Fecha de ejecución						
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM					
Elaborado por	Patricio Cajas	Revisado por	Ing. Diego Núñez			
Parámetros de torneado y lubricación						
Material:	Acero Inoxidable AISI 304					
Método de lubricación:	MQL-SAE-20W50					
Fluido lubricante:	No utilizado					
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)			
	1222 - 195	122 - 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)		
			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		
Registro de mediciones Ra						
Probeta	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)
1A	0,681	0,706	0,7	0,719	0,714	0,704
1B	0,668	0,652	0,691	0,678	0,675	0,6728
1C	0,694	0,655	0,694	0,63	0,66	0,6666
Promedio Total			0,681133333			
Registro de mediciones Rz						
Probeta	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)
1A	3,571	3,871	3,895	3,954	4,12	3,8822
1B	3,923	3,74	3,822	3,381	3,308	3,6348
1C	3,705	3,32	3,757	3,237	3,348	3,4734
Promedio Total			3,663466667			
Resultados						
			Estado Superficial			
			Textura rugosa al tacto, marcas poco perceptibles a simple vista.			
			Clase de rugosidad			
			N6			
Proceso			Torneado.			

A diferencia de la Tabla 6, la Tabla 7 presenta los resultados de calidad superficial obtenidos con el mismo método de mínima cantidad de lubricante, pero combinado con fluido criogénico en este caso CO2 el cual sale a una temperatura entre -50 y -70° C lo cual es adecuado para evitar el sobrecalentamiento de la zona de interacción de la herramienta con la pieza de trabajo con estos resultados se realizará una comparación entre ambos métodos de refrigeración.

Teniendo en cuenta que ambos experimentos emplean el mismo fluido MQL se puede realizar una comparación para conocer la influencia del fluido criogénico en el proceso, con este antecedente se presenta la figura 10 donde se observa la curva de color azul que corresponde a la refrigeración MQL con aceite SAE-20W50 donde las rugosidades Ra obtenidas se encuentran entre 0,66 y 0,704 μm mientras que en el experimento que emplea el mismo refrigerante MQL con CO2 tiene una rugosidad Ra entre 0,5834 y 0,5916.

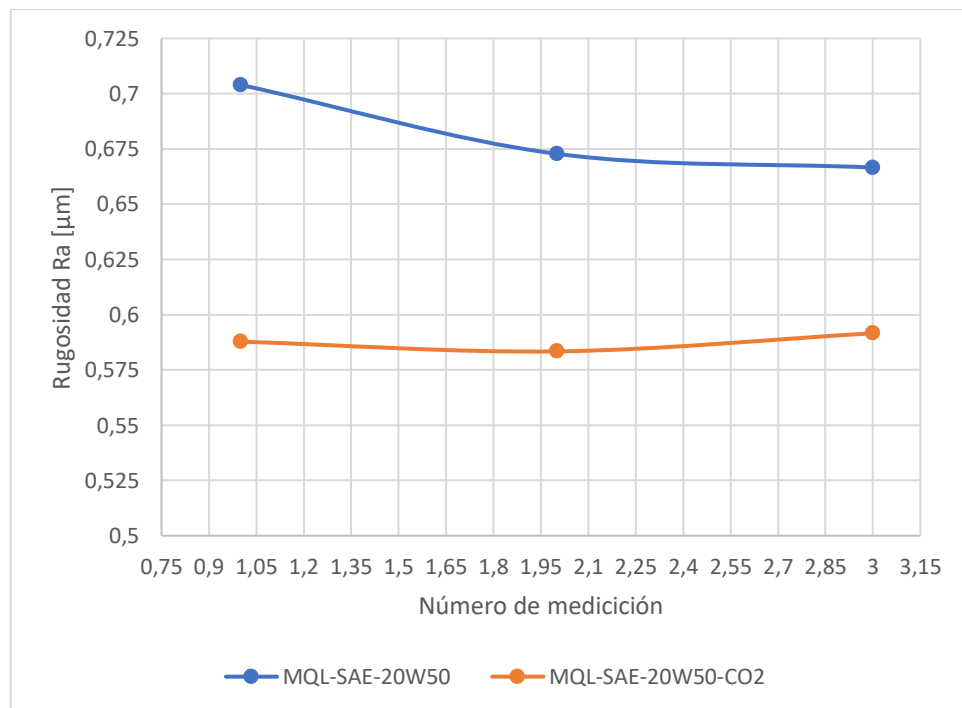





Figura 10. Comparación gráfica del comportamiento de la calidad superficial Ra entre los experimentos 1 y 2.

Tabla 7. Tabla de resultados del experimento MQL-SAE-20W50+CO2 Criogénico

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL						
Datos Informativos						
Tipo de estudio	Experimental	Ítem				
Fecha de ejecución						
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM					
Elaborado por	Patricio Cajas	Revisado por	Ing. Diego Núñez			
Parámetros de torneado y lubricación						
Material:	Acero Inoxidable AISI 304					
Método de lubricación:	MQL-SAE-20W50-CO2					
Fluido lubricante:	No utilizado					
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)			
1222 - 195	122 - 0.1	0,4	0,8			
Caudal lubricante (m/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2 (bar)	Ángulo de incidencia de CO2	Diámetro de la salida de CO2 (mm)		
N/A	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		
Registro de mediciones Ra						
Probeta	Med. 1 (µm)	Med. 2 (µm)	Med. 3 (µm)	Med. 4 (µm)	Med. 5 (µm)	Promedio (µm)
1A	0,605	0,571	0,583	0,595	0,585	0,5878
1B	0,577	0,594	0,584	0,59	0,572	0,5834
1C	0,593	0,587	0,602	0,586	0,59	0,5916
Promedio Total			0,5876			
Registro de mediciones Rz						
Probeta	Med. 1 (µm)	Med. 2 (µm)	Med. 3 (µm)	Med. 4 (µm)	Med. 5 (µm)	Promedio (µm)
1A	3,324	2,936	2,927	3,142	3,086	3,083
1B	2,889	3,089	3,125	3,128	2,994	3,045
1C	3,178	3,055	3,357	3,099	3,298	3,1974
Promedio Total			3,108466667			
Resultados						
			Estado Superficial Textura rugosa al tacto, marcas poco perceptibles a simple vista.			
			Clase de rugosidad N6			
			Proceso Torneado.			

Con los resultados de la tabla 7 resultado se puede concluir que el experimento que combina MQL SAE-20W50 +CO2 produce una calidad superficial superior dado que al evitar que se eleve la temperatura de corte contribuye a que el filo de la herramienta de corte no sufra desgaste prematuro que puede afectar significativamente en el acabado de la pieza, la curva de color naranja en contraste con la azul muestra esa variación significativa en la rugosidad obtenida por ambos métodos de refrigeración, esto se ve reflejado también en la rugosidad Rz medida cuyo comportamiento se presenta en la figura 11.

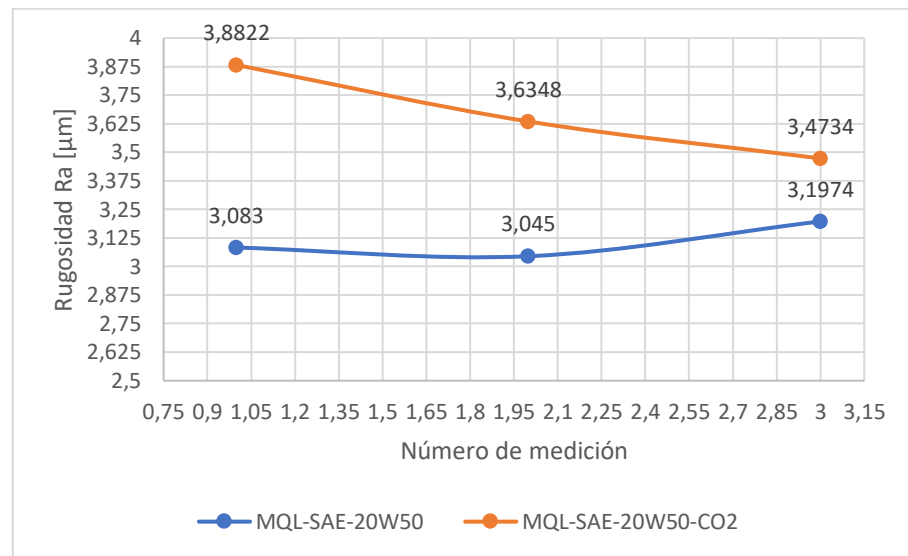



Figura 11. Comparación gráfica del comportamiento de la calidad superficial Rz entre los experimentos 1 y 2.

3.1.2. Aceite de girasol

La tabla 8 muestra los resultados medidos de la calidad superficial obtenidos en el experimento 3, que implica el uso de refrigeración con mínima cantidad de lubricante ACEITE DE GIRASOL. Se presentan los resultados correspondientes a 3 probetas, cada una sometida a 5 corridas. Los valores de rugosidad obtenidos fueron Ra de 0,745 µm y Rz de 2,914 µm. La rugosidad Ra se calcula como la media aritmética de las desviaciones absolutas desde la línea central en una longitud de muestreo, mientras que Rz representa la diferencia entre los valores máximos y

mínimos en esa longitud de muestreo. Estos datos permiten realizar comparaciones con los diversos métodos de refrigeración propuestos en esta investigación.

Tabla 8. Tabla de resultados de la calidad superficial del experimento MQL-Aceite de Girasol

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA		
REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL						
Datos Informativos						
Tipo de estudio	Experimental	Ítem				
Fecha de ejecución						
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM					
Elaborado por	Patricio Cajas	Revisado por	Ing. Diego Núñez			
Parámetros de torneado y lubricación						
Material:	Acero Inoxidable AISI 304					
Método de lubricación:	MQL-ACEITE GIRASOL					
Fluido lubricante:	No utilizado					
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)			
1222 - 195	122 - 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)		
N/A	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 μ m	5		
Registro de mediciones Ra						
Probeta	Med. 1 (μ m)	Med. 2 (μ m)	Med. 3 (μ m)	Med. 4 (μ m)	Med. 5 (μ m)	Promedio (μ m)
1A	0,493	0,445	0,427	0,572	0,522	0,577
1B	0,49	0,495	0,485	0,443	0,531	0,741
1C	0,564	0,477	0,521	0,498	0,447	0,918
Promedio Total			0,745333333			
Registro de mediciones Rz						
Probeta	Med. 1 (μ m)	Med. 2 (μ m)	Med. 3 (μ m)	Med. 4 (μ m)	Med. 5 (μ m)	Promedio (μ m)
1A	3,051	2,935	2,997	3,473	3,162	2,77
1B	3,153	3,041	3,263	2,49	3,311	2,876
1C	3,405	3,057	3,219	3,073	2,818	3,095
Promedio Total			2,913666667			
Resultados						
			<p>Estado Superficial Textura rugosa al tacto, marcas poco perceptibles a simple vista.</p> <p>Clase de rugosidad N6</p> <p>Proceso Torneado.</p>			

En contraste con la tabla de resultados previa (Tabla 8), la tabla 9 exhibe los resultados de calidad superficial obtenidos mediante el mismo método de mínima cantidad de lubricante, pero en este caso, se combina con un fluido criogénico, específicamente CO₂, el cual se suministra a una temperatura que oscila entre -50 y -70 °C. Con estos resultados, se llevará a cabo una comparación entre ambos métodos de refrigeración.

Considerando que ambos experimentos utilizan el mismo fluido MQL, se puede realizar una comparación para entender cómo influye el fluido criogénico en el proceso. Con este contexto, se muestra en la figura 11 una curva de color azul que representa la refrigeración MQL con aceite de girasol. En este caso, las rugosidades Ra obtenidas oscilan entre 0,57 y 0,918 μm . Por otro lado, en el experimento que utiliza el mismo refrigerante MQL, pero con CO₂, la rugosidad Ra varía entre 0,584 y 0,897 μm .

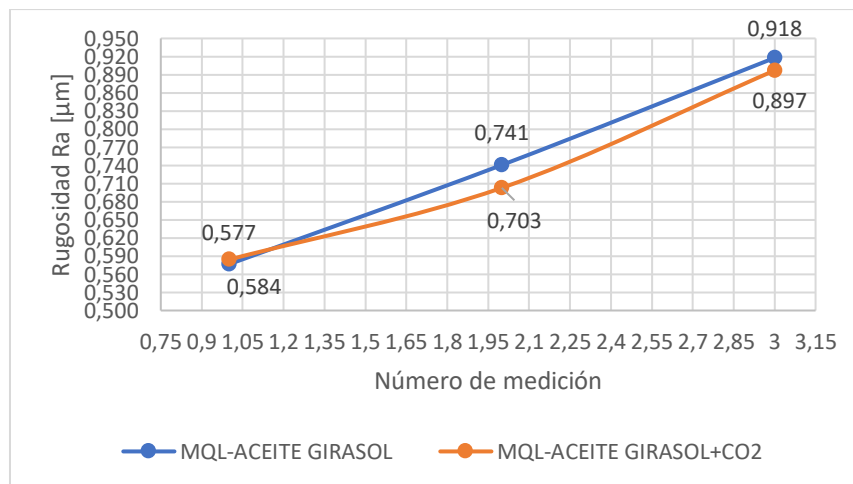





Figura 12. Comparación del comportamiento de la calidad superficial Ra entre los experimentos 3 y 4.

Este resultado permite concluir que el experimento que utiliza la combinación de MQL ACEITE DE GIRASOL genera una calidad superficial superior. Al prevenir el aumento de la temperatura de corte, se evita el desgaste prematuro del filo de la herramienta de corte, lo cual podría tener un impacto considerable en el acabado de la pieza. La curva de color naranja, en comparación con la azul, revela una variación no significativa en la rugosidad obtenida mediante ambos métodos de refrigeración.

Esta diferencia se refleja también en la rugosidad Rz medida, cuyo comportamiento se ilustra en la figura 12.

Tabla 8. Tabla de resultados de la calidad superficial del experimento MQL-Aceite de Girasol+CO2.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA		 FICM				
REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL						
Datos Informativos						
Tipo de estudio	Experimental	Ítem				
Fecha de ejecución						
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM					
Elaborado por	Patricio Cajas	Revisado por	Ing. Diego Núñez			
Parámetros de torneado y lubricación						
Material:	Acero Inoxidable AISI 304					
Método de lubricación:	MQL-ACEITE GIRASOL+CO2					
Fluido lubricante:	No utilizado					
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)			
1222 - 195	122 - 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)		
N/A	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		
Registro de mediciones Ra						
Probeta	Med. 1 (µm)	Med. 2 (µm)	Med. 3 (µm)	Med. 4 (µm)	Med. 5 (µm)	Promedio (µm)
1A	0,502	0,506	0,51	0,501	0,486	0,584
1B	0,379	0,411	0,464	0,471	0,492	0,703
1C	0,468	0,455	0,493	0,482	0,484	0,897
Promedio Total			0,728			
Registro de mediciones Rz						
Probeta	Med. 1 (µm)	Med. 2 (µm)	Med. 3 (µm)	Med. 4 (µm)	Med. 5 (µm)	Promedio (µm)
1A	2,734	3,058	2,92	2,998	2,819	2,588
1B	2,365	2,386	2,683	2,85	2,889	2,529
1C	2,928	2,652	2,66	2,564	2,82	2,771
Promedio Total			2,629333333			
Resultados						
			Estado Superficial Textura rugosa al tacto, marcas poco perceptibles a simple vista.			
			Clase de rugosidad N6			
			Proceso Torneado.			

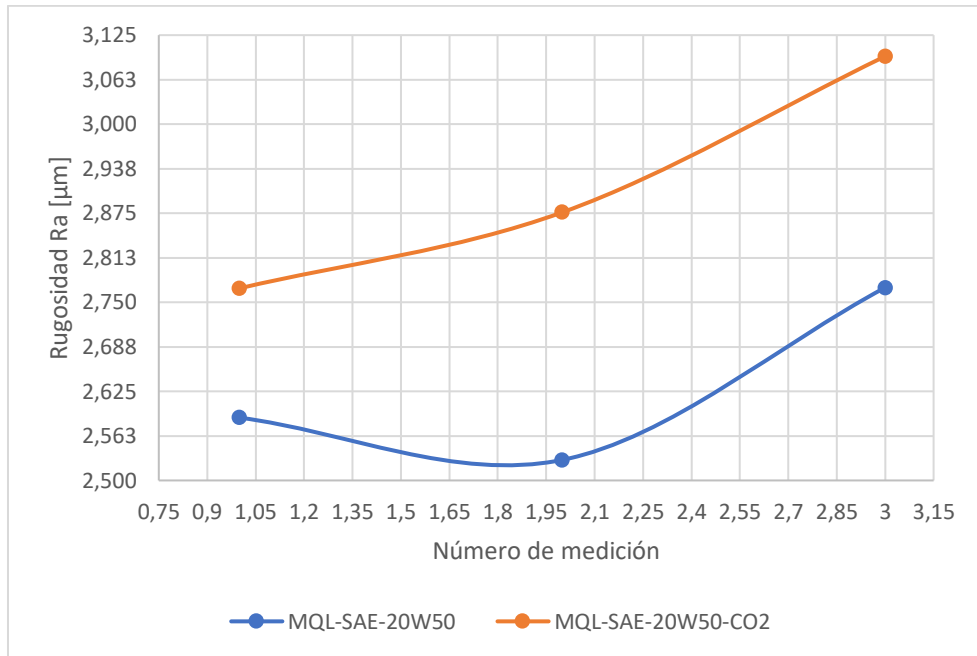


Figura 13. Comparación del comportamiento de la calidad superficial Rz entre los experimentos 3 y 4.

3.1.3. Aceite de oliva

La tabla 9 presenta los resultados medidos de la calidad superficial obtenidos durante el experimento 3, el cual involucra el uso de refrigeración mediante mínima cantidad de lubricante, específicamente ACEITE DE OLIVA. Se detallan los resultados correspondientes a tres probetas, cada una sometida a cinco corridas. Los valores de rugosidad registrados fueron de 0,7820 µm para Ra y 3,143 µm para Rz.

La rugosidad Ra se determina como la media aritmética de las desviaciones absolutas desde la línea central en una longitud de muestreo, mientras que Rz refleja la diferencia entre los valores máximos y mínimos en esa longitud de muestreo. Estos datos posibilitan la comparación con los distintos métodos de refrigeración propuestos en esta investigación.

Tabla 9. Resultados del experimento 5 MQL-Aceite de Oliva







 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA		 FICM				
REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL						
Datos Informativos						
Tipo de estudio	Experimental	Ítem				
Fecha de ejecución						
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM					
Elaborado por	Patricio Cajas	Revisado por	Ing. Diego Núñez			
Parámetros de torneado y lubricación						
Material:	Acero Inoxidable AISI 304					
Método de lubricación:	MQL-ACEITE OLIVA					
Fluido lubricante:	No utilizado					
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)			
1222 - 195	122 - 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)		
N/A	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 μ m	5		
Registro de mediciones Ra						
Probeta	Med. 1 (μ m)	Med. 2 (μ m)	Med. 3 (μ m)	Med. 4 (μ m)	Med. 5 (μ m)	Promedio (μ m)
1A	0,453	0,474	0,517	0,594	0,559	0,6
1B	0,467	0,554	0,559	0,546	0,523	0,775
1C	0,573	0,567	0,556	0,598	0,536	0,972
Promedio Total			0,782333333			
Registro de mediciones Rz						
Probeta	Med. 1 (μ m)	Med. 2 (μ m)	Med. 3 (μ m)	Med. 4 (μ m)	Med. 5 (μ m)	Promedio (μ m)
1A	2,858	2,607	3,136	3,371	2,99	2,66
1B	3,2	3,501	3,555	3,351	3,249	3,143
1C	3,497	3,473	3,401	3,532	3,347	3,375
Promedio Total			3,059333333			
Resultados						
		Estado Superficial Textura rugosa al tacto, marcas poco perceptibles a simple vista.				
		Clase de rugosidad N6				
		Proceso Torneado.				

Tabla 10. Resultados del experimento 6 MQL-Aceite de Oliva+CO2

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL						
Datos Informativos						
Tipo de estudio	Experimental	Ítem				
Fecha de ejecución						
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM					
Elaborado por	Patricio Cajas	Revisado por	Ing. Diego Núñez			
	Parámetros de torneado y lubricación					
Material:	Acero Inoxidable AISI 304					
Método de lubricación:	MQL-ACEITE OLIVA					
Fluido lubricante:	No utilizado					
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)			
			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)		
				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		
Registro de mediciones Ra						
Probeta	Med. 1 (µm)	Med. 2 (µm)	Med. 3 (µm)	Med. 4 (µm)	Med. 5 (µm)	Promedio (µm)
1A	0,493	0,504	0,464	0,469	0,517	0,575
1B	0,503	0,501	0,492	0,499	0,494	0,748
1C	0,501	0,503	0,489	0,49	0,485	0,911
Promedio Total				0,744666667		
Registro de mediciones Rz						
Probeta	Med. 1 (µm)	Med. 2 (µm)	Med. 3 (µm)	Med. 4 (µm)	Med. 5 (µm)	Promedio (µm)
1A	2,775	2,819	2,739	2,772	2,94	2,508
1B	2,798	2,917	2,619	2,876	2,814	2,671
1C	2,853	2,804	2,723	2,732	2,694	2,801
Promedio Total				2,66		
Resultados						
			<p>Estado Superficial Textura rugosa al tacto, marcas poco perceptibles a simple vista.</p> <p>Clase de rugosidad N6</p> <p>Proceso Torneado.</p>			

La tabla 10 presenta los resultados de calidad superficial obtenidos utilizando el mismo método de mínima cantidad de lubricante, pero en esta ocasión, se combina con un fluido criogénico, en concreto CO₂. Este fluido se suministra a una temperatura que varía entre -50 y -70 °C, un rango adecuado para evitar el sobrecalentamiento en la zona de interacción entre la herramienta y la pieza de trabajo. Con estos resultados en mano, se realizará una comparación entre los dos métodos de refrigeración.

Dado que ambos ensayos emplean el mismo fluido MQL, es posible efectuar una comparación para comprender el impacto del fluido criogénico en el proceso. Con este contexto, se presenta en la figura 8 una gráfica de tono azul que ilustra la refrigeración MQL mediante el uso de aceite de oliva. En esta instancia, las calidades superficiales Ra obtenidas fluctúan en el rango de 0,575 a 0,911 μm. En contraste, en el experimento que utiliza el mismo refrigerante MQL, pero con CO₂, la rugosidad Ra varía entre 0,6 y 0,972 μm.

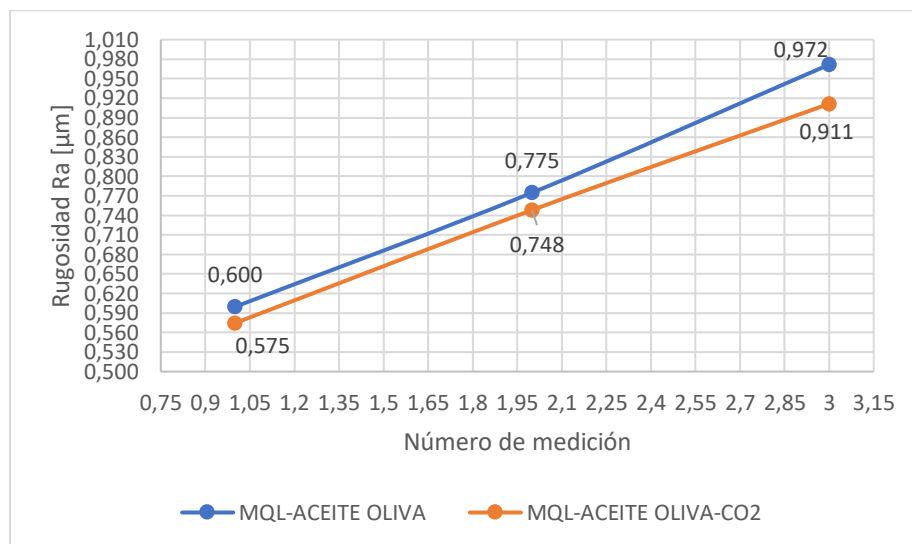


Figura 14. Comparación del comportamiento de la calidad superficial Ra entre los experimentos 5 y 6.

Este resultado indica que el experimento que emplea la combinación de MQL ACEITE DE OLIVA produce una calidad superficial superior en comparación con el experimento que emplea CO₂, sin embargo, se previene el desgaste prematuro del filo de la herramienta de corte, lo cual podría afectar significativamente el acabado de la pieza. La curva de tono naranja, en contraste con la azul, muestra una variación

poco significativa en la rugosidad obtenida mediante ambos métodos de refrigeración. Esta disparidad también se evidencia en la rugosidad Rz medida, cuyo comportamiento se presenta en la figura 15.

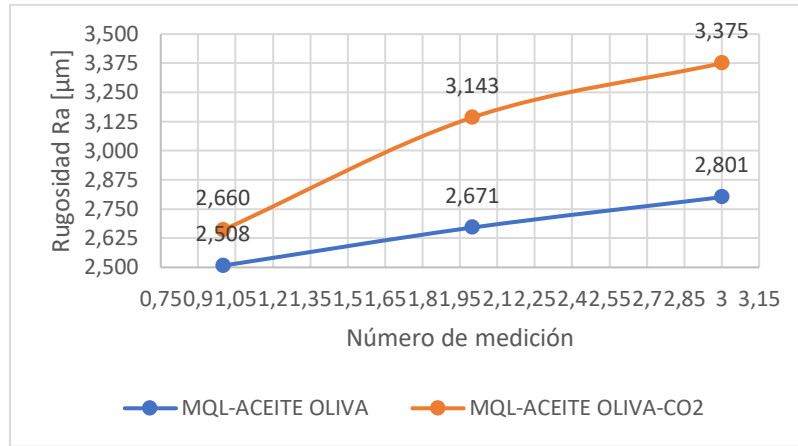


Figura 15. Comparación del comportamiento de la calidad superficial Rz entre los experimentos 5 y 6.

3.2. Calidad superficial medida MQL y MQL con fluido criogénico CO₂ + Nanopartículas de dióxido de Titanio.




El uso de fluidos de corte en procesos de mecanizado desempeña un papel crucial en la calidad superficial de las piezas producidas. En este contexto, el fluido MQL (Minimum Quantity Lubrication) se ha destacado como una alternativa eficiente y sostenible. Según el trabajo de Carranza y Mayorga (2020), el MQL minimiza el consumo de lubricantes al aplicar una pequeña cantidad de fluido directamente sobre la zona de corte, reduciendo la fricción y el desgaste de la herramienta. Además, contribuye a la mejora de la calidad superficial al evitar la acumulación de calor, lo que podría afectar negativamente la integridad de la superficie de la pieza mecanizada.

Por otro lado, la combinación de fluido criogénico CO₂ con nanopartículas de dióxido de titanio ha emergido como una tecnología innovadora con impacto significativo en la calidad superficial que reduce la temperatura de la herramienta y evita deformaciones térmicas. La adición de nanopartículas de dióxido de titanio al fluido proporciona propiedades mejoradas de lubricación y protección. La

investigación de Carranza y Mayorga (2020) respalda la eficacia de esta combinación.




3.2.1. Aceite SAE-20W50

Tabla 11. Resultados de Rugosidad superficial experimento 7 MQL-SAE 20W50+CO2+Nano TiO2.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA 						
REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL						
Datos Informativos						
Tipo de estudio	Experimental	Ítem				
Fecha de ejecución						
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM					
Elaborado por	Patricio Cajas	Revisado por	Ing. Diego Núñez			
Parámetros de torneado y lubricación						
Material:	Acero Inoxidable AISI 304					
Método de lubricación:	MQL-SAE 20W50+CO2+Nano TiO2					
Fluido lubricante:	No utilizado					
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)			
1222 - 195	122 - 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)		
N/A	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		
Registro de mediciones Ra						
Probeta	Med. 1 (µm)	Med. 2 (µm)	Med. 3 (µm)	Med. 4 (µm)	Med. 5 (µm)	Promedio (µm)
1A	0,147	0,19	0,17	0,197	0,186	0,315
1B	0,158	0,137	0,168	0,196	0,203	0,477
1C	0,194	0,151	0,192	0,196	0,195	0,655
Promedio Total			0,482333333			
Registro de mediciones Rz						
Probeta	Med. 1 (µm)	Med. 2 (µm)	Med. 3 (µm)	Med. 4 (µm)	Med. 5 (µm)	Promedio (µm)
1A	0,765	1,091	1,203	1,273	1,068	1,067
1B	0,811	1,019	1,002	1,116	1,138	1,181
1C	1,104	0,877	1,228	1,118	0,946	1,379
Promedio Total			1,209			
Resultados						
			Estado Superficial			
			Textura rugosa al tacto, marcas poco perceptibles a simple vista.			
			Clase de rugosidad			
			N6			
			Proceso			
			Torneado.			




3.2.2. Aceite de girasol

Tabla 12. Resultados de Rugosidad superficial experimento 8 MQL-ACEITE DE GIRASOL+Nano TiO₂.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA		 FICM				
REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL						
Datos Informativos						
Tipo de estudio	Experimental	Ítem				
Fecha de ejecución						
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM					
Elaborado por	Patricio Cajas	Revisado por	Ing. Diego Núñez			
Parámetros de torneado y lubricación						
Material:	Acero Inoxidable AISI 304					
Método de lubricación:	MQL-ACEITE DE GIRASOL+Nano TiO ₂					
Fluido lubricante:	No utilizado					
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)			
1222 - 195	122 - 0.1	0,4	0,8			
Caudal lubricante (ml/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO ₂ (bar)	Ángulo de incidencia de CO ₂	Diámetro de la salida de CO ₂ (mm)		
N/A	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		
Registro de mediciones Ra						
Probeta	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)
1A	0,17	0,176	0,151	0,148	0,105	0,292
1B	0,155	0,127	0,148	0,139	0,146	0,453
1C	0,17	0,16	0,174	0,177	0,145	0,638
Promedio Total			0,461			
Registro de mediciones Rz						
Probeta	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)
1A	1,015	0,998	0,915	0,797	0,583	0,885
1B	0,857	0,694	0,851	0,791	0,743	0,989
1C	0,8	0,718	0,827	0,969	0,746	1,177
Promedio Total			1,017			
Resultados						
			Estado Superficial			
			Textura rugosa al tacto, marcas poco perceptibles a simple vista.			
			Clase de rugosidad			
			N6			
Proceso			Torneado.			




3.2.2.1. Aceite de Oliva

Tabla 13. Resultados de Rugosidad superficial experimento 9 MQL-ACEITE DE OLIVA+Nano TiO₂.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL						
Datos Informativos						
Tipo de estudio	Experimental	Ítem				
Fecha de ejecución						
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM					
Elaborado por	Patricio Cajas	Revisado por	Ing. Diego Núñez			
Parámetros de torneado y lubricación						
Material:	Acero Inoxidable AISI 304					
Método de lubricación	MQL-ACEITE DE OLIVA+Nano TiO ₂					
Fluido lubricante:	No utilizado					
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)			
1222 - 195	122 - 0.1	0,4	0,8			
Caudal lubricante (m/h)	Presión aire comprimido (bar)	Presión CO2 (bar)	Ángulo de incidencia de CO2	Diámetro de la salida de CO2 (mm)		
N/A	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		
Registro de mediciones Ra						
Probeta	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)
1A	0,091	0,098	0,136	0,109	0,139	0,262
1B	0,108	0,126	0,143	0,17	0,115	0,444
1C	0,142	0,12	0,171	0,142	0,157	0,622
Promedio Total			0,442666667			
Registro de mediciones Rz						
Probeta	Med. 1 (μm)	Med. 2 (μm)	Med. 3 (μm)	Med. 4 (μm)	Med. 5 (μm)	Promedio (μm)
1A	0,481	0,582	0,779	0,644	0,774	0,71
1B	0,75	0,641	0,692	0,911	0,605	0,933
1C	0,835	0,736	0,964	0,875	0,804	1,202
Promedio Total			0,948333333			
Resultados						
		<p>Estado Superficial Textura rugosa al tacto, marcas poco perceptibles a simple vista.</p> <p>Clase de rugosidad N6</p> <p>Proceso Torneado.</p>				

3.3. Calidad superficial evaluada con fluido de corte convencional o Taladrina.

Tabla 14. Resultados de Rugosidad superficial experimento 0 Mecanizado con Taladrina.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA						
REPORTE DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL						
Datos Informativos						
Tipo de estudio	Experimental	Ítem				
Fecha de ejecución						
Lugar de estudio	Universidad Técnica de Ambato Laboratorio FICM					
Elaborado por	Patricio Cajas	Revisado por	Ing. Diego Núñez			
Parámetros de torneado y lubricación						
Material:	Acero Inoxidable AISI 304					
Método de lubricación:	IN-TAL					
Fluido lubricante:	No utilizado					
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)			
1222 - 195	122 - 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)		
N/A	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		
Registro de mediciones Ra						
Probeta	Med. 1 (µm)	Med. 2 (µm)	Med. 3 (µm)	Med. 4 (µm)	Med. 5 (µm)	Promedio (µm)
1A	0,767	0,729	0,711	0,7	0,771	0,78
1B	0,806	0,747	0,764	0,782	0,766	0,978
1C	0,877	0,831	0,89	0,832		1,286
Promedio Total				1,014666667		
Registro de mediciones Rz						
Probeta	Med. 1 (µm)	Med. 2 (µm)	Med. 3 (µm)	Med. 4 (µm)	Med. 5 (µm)	Promedio (µm)
1A	4,518	4,42	4,498	4,557	4,872	3,978
1B	4,577	4,7	4,461	4,304	4,315	4,06
1C	4,996	4,948	4,915	4,471		4,466
Promedio Total				4,168		
Resultados						
			Estado Superficial Textura rugosa al tacto, marcas poco perceptibles a simple vista. Clase de rugosidad N6 Proceso Torneado.			

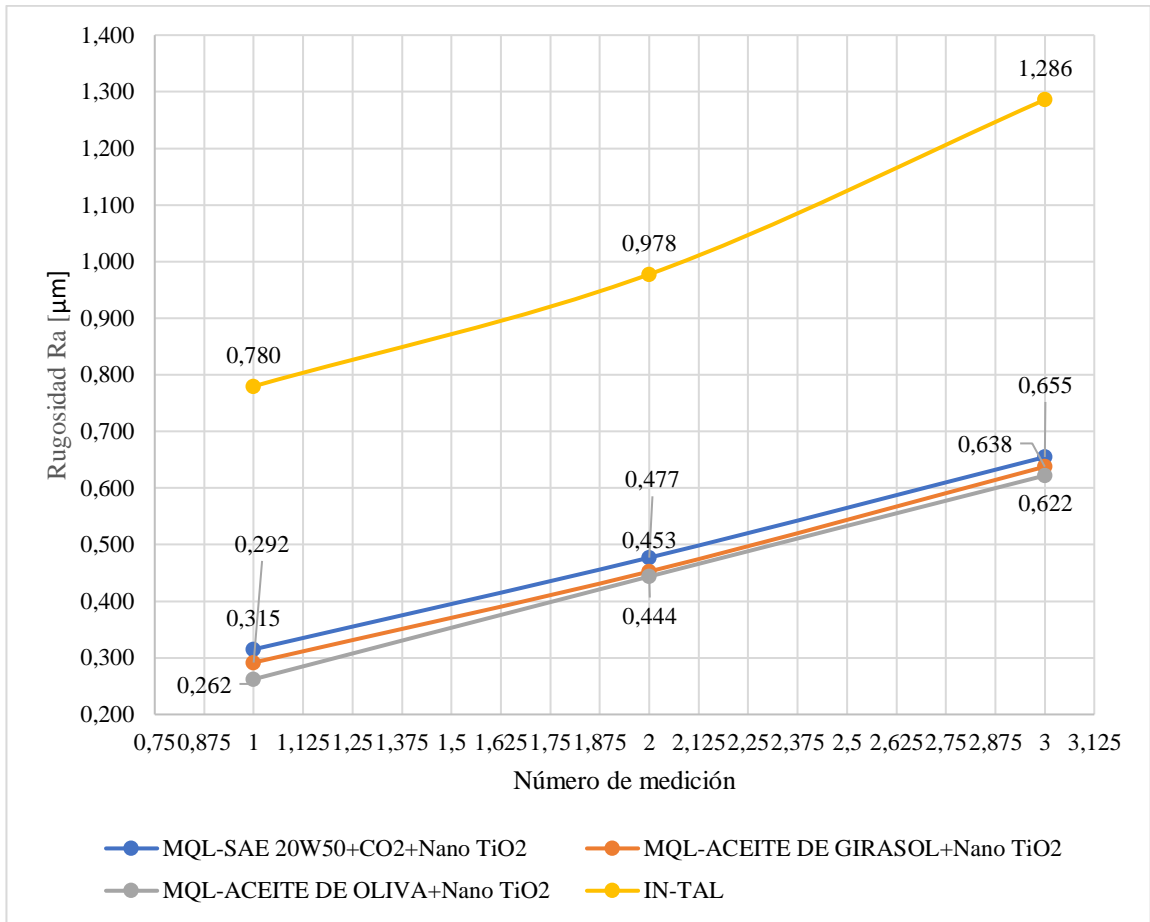


Figura 16. Comportamiento de la calidad superficial Ra de los experimentos CO₂+NanoTiO₂

En la figura 1 se representan los resultados de rugosidad superficial Ra obtenida en los experimentos en los que se utilizó fluido Criogénico CO₂ y nanopartículas comparada con los resultados obtenidos con fluido de corte convencional o taladrina, en este caso se nota que las máximas rugosidades se obtienen con taladrina, mientras que las mínimas con fluido criogénico con nanopartículas siendo la más baja la combinación con aceite de oliva, esto demuestra la influencia del fluido de corte en el acabado superficial.

3.4.Comparación general de resultados

En la Tabla 15, se presentan todas las medias obtenidas tanto para la rugosidad superficial Ra como para Rz. Se observa que la calidad mínima se registra en el experimento que utiliza el fluido de corte convencional o taladrina, con valores de 1,0144 para Ra y 4,1677 para Rz.

En contraste, la calidad superficial máxima se logra en el experimento que emplea MQL-ACEITE DE OLIVA+CO₂+TiO₂, obteniendo valores de 0,4436 para Ra y 0,9485 para Rz. Este resultado indica que el uso de aceite de oliva mejora significativamente la rugosidad, ya que optimiza el par tribológico entre la herramienta de corte y la pieza de trabajo. Además, la presencia de CO₂ enfría de manera sustancial la zona de contacto, mientras que las nanopartículas de dióxido de titanio (Nano TiO₂) contribuyen a evacuar eficazmente el calor, asegurando así la vida útil del filo de la herramienta de corte y su radio de punta.

Es importante destacar que la combinación de MQL, aceite de oliva, CO₂ y Nano TiO₂ no solo mejora la calidad superficial, sino que también proporciona beneficios adicionales en términos de prolongar la vida útil de las herramientas y garantizar un acabado más preciso y consistente en las piezas mecanizadas. Estos resultados respaldan la eficacia de esta combinación de fluidos en aplicaciones de mecanizado.

Tabla 15. Resultados generales de calidad superficial obtenidos en todos los experimentos.

N°	Experimento	Ra promedio	Rz Promedio
1	IN-TAL	1,0144	4,1677
2	MQL-SAE 20W50	0,6811	3,6635
3	MQL-SAE 20W50+CO ₂	0,5876	3,1085
4	MQL-SAE 20W50+CO ₂ +TiO ₂	0,4822	1,2088
5	MQL-ACEITE GIRASOL	0,745	2,9138
6	MQL-ACEITE GIRASOL+CO ₂	0,728	2,6292
7	MQL-ACEITE GIRASOL+CO ₂ +TiO ₂	0,4606	1,0169
8	MQL-ACEITE DE OLIVA	0,782	3,0593
9	MQL-ACEITE DE OLIVA+CO ₂	0,7447	2,6597
10	MQL-ACEITE DE OLIVA+CO ₂ +TiO ₂	0,4426	0,9485
Máximo	IN-TAL	1,0144	4,1677
Mínimo	MQL-ACEITE DE OLIVA+CO₂+TiO₂	0,4426	0,9485

Para una mejor comprensión de los resultados de la rugosidad superficial Ra, se presenta el gráfico de radar mostrado en la Figura 17, el cual ordena de mayor a menor los resultados obtenidos en cada experimento. Los valores que se aproximan

más al centro del gráfico corresponden a los experimentos en los que se ha alcanzado la máxima calidad superficial, es decir, la menor rugosidad superficial.

En este contexto, se observa que los dos experimentos que han logrado el acabado más aceptable son aquellos en los que se emplea aceite de oliva en un sistema MQL, combinado con CO₂ y nanopartículas de dióxido de titanio [Nano TiO₂]. Esto indica que este fluido de corte en MQL es ideal para obtener rugosidades superficiales óptimas en procesos de mecanizado por arranque de viruta de materiales complicados, como los aceros inoxidable.

Ampliando la perspectiva, la combinación de aceite de oliva, CO₂ y Nano TiO₂ no solo mejora la calidad superficial, sino que también ofrece ventajas adicionales. Por ejemplo, la presencia de aceite de oliva optimiza el par tribológico, el CO₂ enfría de manera eficiente la zona de contacto, y las nanopartículas de dióxido de titanio ayudan a evacuar el calor. Estos factores combinados contribuyen no solo a obtener acabados de alta calidad, sino también a prolongar la vida útil de las herramientas de corte y a mantener un rendimiento consistente en el mecanizado de materiales desafiantes como los aceros inoxidable. Estos hallazgos respaldan la idoneidad de este enfoque en aplicaciones específicas de mecanizado.

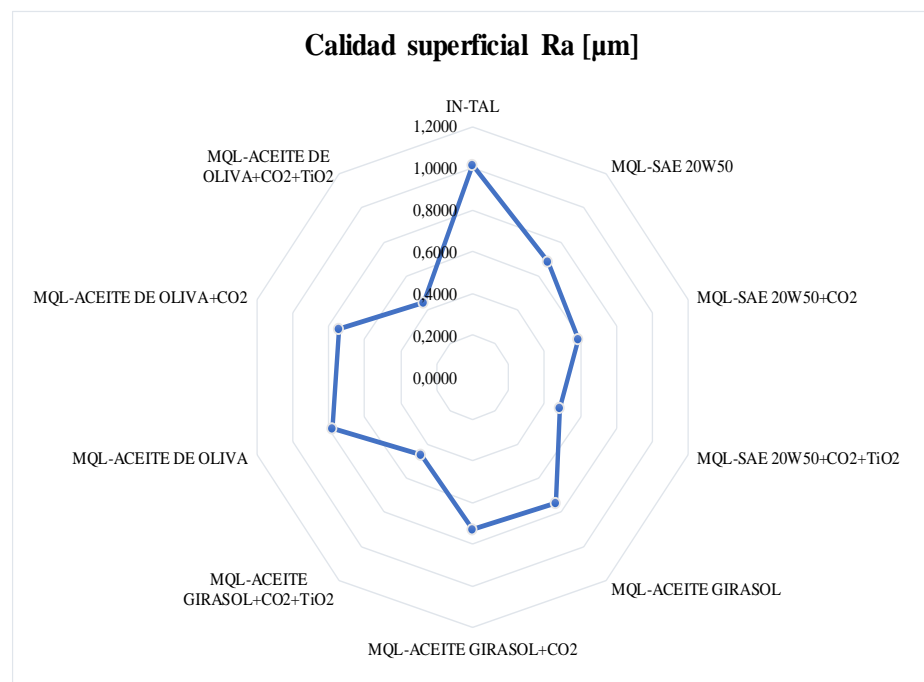


Figura 17. Gráfico de radar de la calidad superficial Ra obtenida en todos los experimentos.

Para una mejor interpretación de los resultados de la rugosidad Rz en micras, se presenta el gráfico de radar, exhibido en la Figura 18 que ordena de mayor a menor los resultados obtenidos en cada experimento. Los valores más cercanos al centro del gráfico corresponden a los experimentos que han alcanzado la máxima calidad superficial, es decir, la menor rugosidad Rz.

Destaca que los dos experimentos que han logrado el acabado más satisfactorio son aquellos en los que se emplea aceite de oliva en un sistema MQL, combinado con CO2 y nanopartículas de dióxido de titanio [Nano TiO2]. Esto sugiere que este fluido de corte en MQL es altamente efectivo para lograr rugosidades Rz óptimas en procesos de mecanizado por arranque de viruta, especialmente al trabajar con materiales desafiantes como los aceros inoxidables.

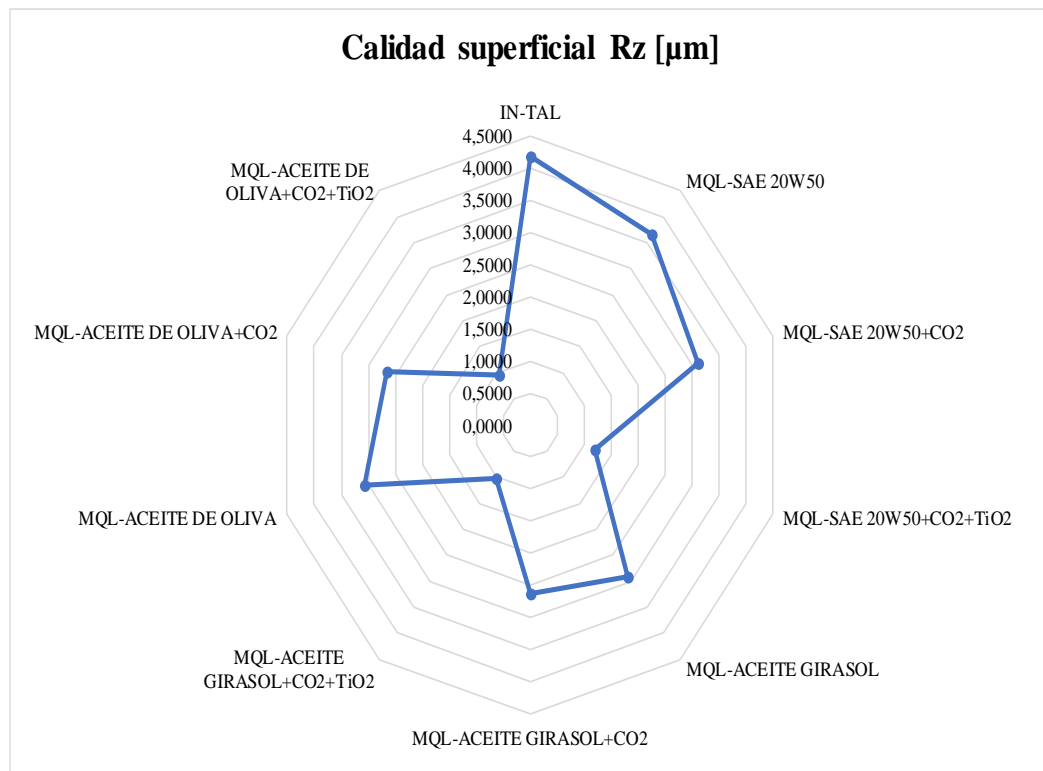


Figura 18. Gráfico de radar de la calidad superficial Ra obtenida en todos los experimentos.

3.5. Propiedades físicas de los aceites utilizados como fluido de corte.

Tabla 16. Tipo de muestra de aceite y condiciones para la determinación de las propiedades de los aceites.

Tipo	Código	Cantidad Analizada [ml]
Aceite de girasol	1370-01	500
Aceite de oliva	1370-02	500
Temperatura de análisis	12 a 22° C	
Humedad relativa [%]	32 a 70	
Presión [kPa]	72,4 a 73,2	

En la tabla 16 se presentan los datos generales de las muestras de aceites empleadas para los distintos ensayos de caracterización, especialmente de los aceites de origen vegetal de oliva y girasol, la temperatura, presión y humedad relativa corresponde a la ambiental. Para obtener dichos parámetros se emplearon 500 ml de cada muestra, también se asigna un código apropiado para identificar el tipo de aceite.

Por otro lado, la tabla 17 muestra los resultados de los ensayos empleados para conocer las propiedades físicas de los aceites vegetales entre estas están sus densidades, viscosidades cinemáticas, índice de viscosidad y punto de inflamación de copa abierta, observamos que los aceites de oliva y girasol tienen propiedades similares sin embargo la muestra 1370-01 que corresponde a aceite de girasol es ligeramente más densa que el aceite de oliva.

La diferencia significativa radica en el punto de inflamación de copa abierta donde se nota claramente que el aceite que es más inflamable es el de oliva ya que requiere de una temperatura menor para entrar en ignición, sin embargo, en la zona de contacto de la herramienta con la pieza no se alcanza dicha temperatura lo cual no supone un peligro para usar dicho aceite con el sistema MQL.

Tabla 17. Resultados obtenidos para la caracterización de los aceites de oliva y girasol

Muestra	Ensayo	Norma método	Unidades	Valor obtenido
1370-01	Densidad relativa 15,6 °C	ASTM-D1298-12b	kg/m ³	921,5
	Viscosidad cinemática a 40°C	ASTM-D445	mm ² /s	33,2
	Viscosidad cinemática a 100°C	ASTM-D446	mm ² /s	7,8
	Índice de viscosidad	ASTM D2270	...	229
	Punto de Inflamación copa abierta	ASTM-D92	°C	318,2
1370-02	Densidad relativa 15,6 °C	ASTM-D1298-12b	kg/m ³	916,1
	Viscosidad cinemática a 40°C	ASTM-D445	mm ² /s	38,5
	Viscosidad cinemática a 100°C	ASTM-D446	mm ² /s	8,3
	Índice de viscosidad	ASTM D2270	...	198
	Punto de Inflamación copa abierta	ASTM-D92	°C	224,2

Estos resultados fueron obtenidos por pruebas de laboratorio cuyo informe se encuentra en el ANEXO 4 para garantizar la validez de dichos resultados.

3.6. Verificación de la hipótesis.

3.6.1. Modelo T-Student

El modelo t-Student, también conocido como la distribución t de Student o simplemente la distribución t, es una distribución de probabilidad que se utiliza comúnmente en estadística para realizar pruebas de hipótesis sobre la media de una población cuando el tamaño de la muestra es pequeño y la desviación estándar poblacional es desconocida [2].

Cuando se trabaja con muestras pequeñas, la distribución t es más apropiada que la distribución normal estándar (z) porque tiene colas más anchas, reflejando la mayor incertidumbre asociada con estimar la verdadera desviación estándar de la población a partir de una muestra pequeña.

La prueba t de Student se utiliza para verificar hipótesis sobre la media poblacional. Por ejemplo, si tienes una muestra y deseas saber si la media de la población de la que proviene esa muestra es igual a un valor específico, puedes realizar una prueba t. El proceso implica calcular el valor t observado y compararlo con un valor crítico de t proveniente de la tabla de la distribución t. Si el valor t observado cae en la región de rechazo (extremo superior o inferior), se rechaza la hipótesis nula en favor de la alternativa [2].

3.6.2. Hipótesis

¿El tipo de aceite usado como fluido de corte en el proceso de torneado del acero AISI 304 influye en la rugosidad superficial Ra alcanzada?

3.6.3. Variable dependiente

Rugosidad Ra alcanzada mediante el proceso de torneado en el Acero AISI 304

3.6.4. Variable independiente

Tipo de aceite usado como fluido de corte.

3.6.5. Hipótesis nula H_0

El tipo de aceite usado como fluido de corte en el proceso de torneado del acero AISI 304 no mejora ni empeora la calidad superficial alcanzada expresada como Rugosidad Ra, es decir la calidad superficial se mantiene independientemente del aceite que se use en el sistema MQL.

3.6.6. Hipótesis alterna H_a

El tipo de aceite usado como fluido de corte en el proceso de torneado del acero AISI 304 mejora o empeora la calidad superficial alcanzada expresada como

Rugosidad Ra, es decir la calidad superficial varía en función del aceite que se use en el sistema MQL.

3.6.7. Modelo matemático de verificación de hipótesis

Ec. 3.

$$H_0 = Ra(\text{MQL} - \text{SAE 20W50}) = Ra(\text{MQL} - \text{ACEITE OLIVA})$$

$$H_a = Ra(\text{MQL} - \text{SAE 20W50}) \neq Ra(\text{MQL} - \text{ACEITE OLIVA})$$

3.6.8. Nivel de significancia

El nivel de confianza escogido es del 95% por ende, el nivel de significancia es del 5% lo que corresponde a un valor p de 0,05

3.6.9. Grados de libertad

Ec. 4.

$$v = n_1 + n_2 - 2$$

$$v = 15 + 15 - 2$$

$$v = 28$$

Donde:

v: Grados de libertad

n1: número de muestra del experimento con aceite SAE 20W50

n2: número de muestra del experimento con aceite de oliva.

Tabla 18. Distribución T-student

Degrees of freedom (<i>df</i>)	.2	.15	.1	.05	.025	.01	.005	.001
1	3.078	4.165	6.314	12.706	25.452	63.657	127.321	636.619
2	1.886	2.282	2.920	4.303	6.205	9.925	14.089	31.599
3	1.638	1.924	2.353	3.182	4.177	5.841	7.453	12.924
4	1.533	1.778	2.132	2.776	3.495	4.604	5.598	8.610
5	1.476	1.699	2.015	2.571	3.163	4.032	4.773	6.869
6	1.440	1.650	1.943	2.447	2.969	3.707	4.317	5.959
7	1.415	1.617	1.895	2.365	2.841	3.499	4.029	5.408
8	1.397	1.592	1.860	2.306	2.752	3.355	3.833	5.041
9	1.383	1.574	1.833	2.262	2.685	3.250	3.690	4.781
10	1.372	1.559	1.812	2.228	2.634	3.169	3.581	4.587
11	1.363	1.548	1.796	2.201	2.593	3.106	3.497	4.437
12	1.356	1.538	1.782	2.179	2.560	3.055	3.428	4.318
13	1.350	1.530	1.771	2.160	2.533	3.012	3.372	4.221
14	1.345	1.523	1.761	2.145	2.510	2.977	3.326	4.140
15	1.341	1.517	1.753	2.131	2.490	2.947	3.286	4.073
16	1.337	1.512	1.746	2.120	2.473	2.921	3.252	4.015
17	1.333	1.508	1.740	2.110	2.458	2.898	3.222	3.965
18	1.330	1.504	1.734	2.101	2.445	2.878	3.197	3.922
19	1.328	1.500	1.729	2.093	2.433	2.861	3.174	3.883
20	1.325	1.497	1.725	2.086	2.423	2.845	3.153	3.850
21	1.323	1.494	1.721	2.080	2.414	2.831	3.135	3.819
22	1.321	1.492	1.717	2.074	2.405	2.819	3.119	3.792
23	1.319	1.489	1.714	2.069	2.398	2.807	3.104	3.768
24	1.318	1.487	1.711	2.064	2.391	2.797	3.091	3.745
25	1.316	1.485	1.708	2.060	2.385	2.787	3.078	3.725
26	1.315	1.483	1.706	2.056	2.379	2.779	3.067	3.707
27	1.314	1.482	1.703	2.052	2.373	2.771	3.057	3.690
28	1.313	1.480	1.701	2.048	2.368	2.763	3.047	3.674
29	1.311	1.479	1.699	2.045	2.364	2.756	3.038	3.659

De la tabla 18 se obtiene el valor del coeficiente T tabulado que en este caso para 28 grados de libertad corresponde a 2,048 obtenido para un nivel de significancia P de 0,05.

3.6.10. Cálculo de la distribución T comparado aceite SAE 20W50 y aceite de oliva.

La tabla 19 muestra el cálculo de los promedios de 5 mediciones en 3 experimentos de MQL + Aceite SAE 20W50 y MQL + Aceite de almendra para conocer que existe variación de resultados al cambiar el tipo de fluido de corte, estos resultados son útiles para calcular la varianza y el valor t calculado en el modelo T-student.

Tabla 19. Valores estadísticos empleados en la distribución calculada

N°	x	y
	MQL Aceite SAE 20W50	MQL Aceite Almendra
1	0,493	0,453
2	0,49	0,467
3	0,564	0,573
4	0,445	0,474
5	0,495	0,554
6	0,477	0,567
7	0,427	0,517
8	0,485	0,559
9	0,521	0,556
10	0,572	0,594
11	0,443	0,546
12	0,498	0,598
13	0,522	0,559
14	0,531	0,523
15	0,447	0,536
Media μ	0,494	0,5384

3.6.11. Varianza

Ec. 5.

$$S^2 = \frac{\sum(x - \mu_x)^2 + \sum(y - \mu_y)^2}{v}$$

Donde:

x: Valores del conjunto de datos MQL Aceite SAE 20W40

y: Valores del conjunto de datos MQL Aceite de Oliva

v: Grados de libertad

S^2 : Varianza

Tabla 20. Datos empleados en el cálculo de la varianza.

N°	x	y	(x-μx)^2	(y-μy)^2
	MQL Aceite SAE 20W50	MQL Aceite Almendra		
1	0,493	0,453	0,000001	0,00729316
2	0,49	0,467	0,2401	0,218089
3	0,564	0,573	0,318096	0,328329
4	0,445	0,474	0,198025	0,224676
5	0,495	0,554	0,245025	0,306916
6	0,477	0,567	0,227529	0,321489
7	0,427	0,517	0,182329	0,267289
8	0,485	0,559	0,235225	0,312481
9	0,521	0,556	0,271441	0,309136
10	0,572	0,594	0,327184	0,352836
11	0,443	0,546	0,196249	0,298116
12	0,498	0,598	0,248004	0,357604
13	0,522	0,559	0,272484	0,312481
14	0,531	0,523	0,281961	0,273529
15	0,447	0,536	0,199809	0,287296
Media μ	0,494	0,5384		
Sumatoria			3,443462	4,1775602

$$S^2 = \frac{3,443462 - 4,1775602}{28}$$

$$S^2 = 0,02622$$

3.6.12. Distribución T

Ec. 5.

$$t = \frac{\mu x - \mu y}{\sqrt{\frac{S^2}{n_1} + \frac{S^2}{n_2}}}$$

$$t = \frac{0.494 - 0.5384}{\sqrt{\frac{0.02622}{28} + \frac{0.02622}{28}}}$$

$$t = 1.02596$$

$$t_{calculado} = 1.02596 \leq T_{tabulado} = 2.048$$

El resultado de T Tabulado es mayor que el calculado por tanto se rechaza la hipótesis nula y se da como aceptada a la hipótesis alterna lo que indica que:

El acabado superficial se ve influenciado por el tipo de Aceite que se use como fluido de corte MQL en el proceso de torneado del acero AISI 304.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Luego de revisar varias fuentes bibliográficas especializadas en el uso de diferentes tipos de aceite como fluidos de corte se seleccionaron para los experimentos aceites vegetales de oliva y girasol, y un aceite comercial SAE 20W50 estos han sido ampliamente utilizados en investigaciones previas como fluido MQL a modo de aerosol, sin embargo, no han sido combinados con aditivos como nanopartículas minerales o fluidos criogénicos lo cual si se realizó en esta investigación obteniendo buenos resultados.
- En el mercado local existe un sinnúmero de aceites vegetales que pueden ser usados como fluidos de corte, uno de ellos es el de girasol que es de bajo costo y puede ser adquirido con facilidad por su disponibilidad, y el de oliva que, aunque es abundante tiene un costo superior, otra opción que se identificó es el aceite comercial SAE 20W50 que también puede ser aplicado por el método MQL pero la investigación se centró principalmente en identificar una opción que sea biodegradable y amigable con el medio ambiente, por ende, se hizo énfasis en los aceites vegetales.
- Se realizaron pruebas de laboratorio para determinar las propiedades físicas de los aceites vegetales de girasol y oliva utilizados como fluido de corte el más viscoso fue el aceite de oliva cuya viscosidad cinemática alcanzó en las pruebas $38,5 \text{ mm}^2/\text{s}$ a 40°C y $8,3 \text{ mm}^2/\text{s}$ a 100°C , mientras que para el aceite de girasol se obtuvo $33,2 \text{ mm}^2/\text{s}$ a 40°C y $7,8 \text{ mm}^2/\text{s}$ a 100°C .
- Se realizaron pruebas de torneado con los diferentes aceites utilizados como fluido de corte combinando diferentes métodos de refrigeración/lubricación, se obtuvieron resultados satisfactorios con los aceites vegetales especialmente con las combinaciones de aceite de oliva combinado con CO_2 y nano partículas de

dióxido de titanio, que en comparación con la taladrina produce una mejor calidad superficial en el proceso de torneado del acero AISI 304.

- Con los resultados de rugosidad medida se comparó su comportamiento en función de los aceites utilizados como fluido de corte en procesos de mecanizado obteniendo la rugosidad mínima en la combinación de aceite de oliva con CO₂ y nano partículas de dióxido de titanio siendo de 0,4426 μm Ra y 0,9485 μm Rz, en comparación con el fluido de corte tradicional o taladrina estos resultados son satisfactorios ya que al medir la rugosidad en este caso se obtuvo un valor mas alto de 1,0144 Ra y 4,1677 Rz.

4.2. Recomendaciones

1. Investigar la transferencia de calor durante el mecanizado con MQL y fluidos criogénicos, con el objetivo de comprender mejor cómo estos procesos afectan la temperatura de la herramienta y la pieza.
2. Explorar la aplicabilidad de la combinación de MQL y fluidos criogénicos en procesos de mecanizado de alta velocidad, considerando la posible influencia en la calidad superficial y la eficiencia del proceso.
3. Evaluar la posibilidad de desarrollar fluidos MQL personalizados con otra clase de nanopartículas o aditivos, adaptados a las características específicas de diferentes materiales y procesos de mecanizado.
4. Investigar la influencia de la humedad relativa en la eficacia del MQL y los fluidos criogénicos, considerando condiciones ambientales variables que puedan afectar el rendimiento.
5. Explorar la aplicación de técnicas avanzadas de análisis de imagen y procesamiento de datos para una evaluación más detallada y cuantitativa de la calidad superficial obtenida en los experimentos.
6. Investigar la posibilidad de implementar sistemas de control automático para la aplicación de MQL y fluidos criogénicos, con el objetivo de optimizar la precisión y consistencia del proceso de mecanizado.
7. Realizar estudios de simulación numérica para modelar la interacción de MQL y fluidos criogénicos con la herramienta y la pieza, proporcionando una comprensión más profunda de los fenómenos físicos involucrados.
8. Plantear nuevas investigaciones relacionadas con la aplicación de nuevos fluidos criogénicos como es el caso del nitrógeno líquido y combinarlo con diferentes aceites vegetales para estudiar el comportamiento de la rugosidad superficial en el acero AISI 304 y otros materiales ferrosos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] O. Pereira, A. Rodríguez, A. I. Fernández-Abia, J. Barreiro, and L. N. López de Lacalle, “Cryogenic and minimum quantity lubrication for an eco-efficiency turning of AISI 304,” *J Clean Prod*, vol. 139, pp. 440–449, Dec. 2016, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2016.08.030.
- [2] K. Kumar Gajrani and M. Ravi Sankar, “Past and Current Status of Eco-Friendly Vegetable Oil Based Metal Cutting Fluids,” *Mater Today Proc*, vol. 4, no. 2, pp. 3786–3795, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.MATPR.2017.02.275.
- [3] W. L. R. Fernando, N. Sarmilan, K. C. Wickramasinghe, H. M. C. M. Herath, and G. I. P. Perera, “Experimental investigation of Minimum Quantity Lubrication (MQL) of coconut oil based Metal Working Fluid,” *Mater Today Proc*, vol. 23, pp. 23–26, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.MATPR.2019.06.079.
- [4] M. S. Khan, M. S. Sisodia, S. Gupta, M. Feroskhan, S. Kannan, and K. Krishnasamy, “Measurement of tribological properties of Cu and Ag blended coconut oil nanofluids for metal cutting,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 22, no. 6, pp. 1187–1192, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.JESTCH.2019.04.005.
- [5] S. A. Lawal, I. A. Choudhury, and Y. Nukman, “Evaluation of vegetable and mineral oil-in-water emulsion cutting fluids in turning AISI 4340 steel with coated carbide tools,” *J Clean Prod*, vol. 66, pp. 610–618, Mar. 2014, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2013.11.066.
- [6] E. A. Rahim and H. Sasahara, “A study of the effect of palm oil as MQL lubricant on high speed drilling of titanium alloys,” *Tribol Int*, vol. 44, no. 3, pp. 309–317, Mar. 2011, doi: 10.1016/J.TRIBOINT.2010.10.032.
- [7] K. Manojkumar and A. Ghosh, “Assessment of cooling-lubrication and wettability characteristics of nano-engineered sunflower oil as cutting fluid and its impact on SQCL grinding performance,” *J Mater Process Technol*, vol. 237, pp. 55–64, Nov. 2016, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2016.05.030.

- [8] B. Li, C. Li, Y. Zhang, Y. Wang, D. Jia, and M. Yang, "Grinding temperature and energy ratio coefficient in MQL grinding of high-temperature nickel-base alloy by using different vegetable oils as base oil," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 29, no. 4, pp. 1084–1095, Aug. 2016, doi: 10.1016/J.CJA.2015.10.012.
- [9] P. J. Liew, A. Shaaroni, N. A. C. Sidik, and J. Yan, "An overview of current status of cutting fluids and cooling techniques of turning hard steel," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 114, pp. 380–394, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2017.06.077.
- [10] M. H. S. Elmunafi, M. Y. Noordin, and D. Kurniawan, "Tool Life of Coated Carbide Cutting Tool when Turning Hardened Stainless Steel under Minimum Quantity Lubricant Using Castor Oil," *Procedia Manuf*, vol. 2, pp. 563–567, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.PROMFG.2015.07.097.
- [11] P. C. Priarone, M. Robiglio, L. Settineri, and V. Tebaldo, "Effectiveness of Minimizing Cutting Fluid Use when Turning Difficult-to-cut Alloys," *Procedia CIRP*, vol. 29, pp. 341–346, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.PROCIR.2015.02.006.
- [12] S. Bhaumik, V. Paleu, S. Sharma, S. Dwivedi, S. Borkar, and M. Kamaraj, "Nano and micro additivated glycerol as a promising alternative to existing non-biodegradable and skin unfriendly synthetic cutting fluids," *J Clean Prod*, vol. 263, p. 121383, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.121383.
- [13] A. C. Okafor, "Cooling and machining strategies for high speed milling of titanium and nickel super alloys," *High-Speed Machining*, pp. 127–161, Jan. 2020, doi: 10.1016/B978-0-12-815020-7.00005-9.
- [14] P. Shah, N. Khanna, and Chetan, "Comprehensive machining analysis to establish cryogenic LN2 and LCO2 as sustainable cooling and lubrication techniques," *Tribol Int*, vol. 148, p. 106314, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.TRIBOINT.2020.106314.

- [15] N. Khanna, P. Shah, and Chetan, “Comparative analysis of dry, flood, MQL and cryogenic CO₂ techniques during the machining of 15-5-PH SS alloy,” *Tribol Int*, vol. 146, p. 106196, Jun. 2020, doi: 10.1016/J.TRIBOINT.2020.106196.
- [16] S. Singh Bedi, S. Prasad Sahoo, B. Vikas, and S. Datta, “Influence of cutting speed on dry machinability of AISI 304 stainless steel,” *Mater Today Proc*, vol. 38, pp. 2174–2180, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2020.05.554.
- [17] H. Hegab, H. A. Kishawy, and B. Darras, “Sustainable Cooling and Lubrication Strategies in Machining Processes: A Comparative Study,” *Procedia Manuf*, vol. 33, pp. 786–793, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.PROMFG.2019.04.099.
- [18] K. K. Gajrani, D. Ram, and M. Ravi Sankar, “Biodegradation and hard machining performance comparison of eco-friendly cutting fluid and mineral oil using flood cooling and minimum quantity cutting fluid techniques,” *J Clean Prod*, vol. 165, pp. 1420–1435, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.07.217.
- [19] M. Naresh Babu, V. Anandan, N. Muthukrishnan, and M. Santhanakumar, “End milling of AISI 304 steel using Minimum Quantity Lubrication,” *Measurement*, vol. 138, pp. 681–689, May 2019, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2019.01.064.
- [20] R. L. Viridi, S. S. Chatha, and H. Singh, “Machining performance of Inconel-718 alloy under the influence of nanoparticles based minimum quantity lubrication grinding,” *J Manuf Process*, vol. 59, pp. 355–365, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2020.09.056.
- [21] N. Liu, X. Zou, J. Yuan, S. Wu, and Y. Chen, “Performance evaluation of castor oil-ethanol blended coolant under minimum quantity lubrication turning of difficult-to-machine materials,” *J Manuf Process*, vol. 58, pp. 1–10, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2020.07.058.

- [22] Chetan, S. Ghosh, and P. Venkateswara Rao, "Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review," *J Clean Prod*, vol. 100, pp. 17–34, Aug. 2015, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2015.03.039.
- [23] A. Shokrani and J. Betts, "A new hybrid minimum quantity lubrication system for machining difficult-to-cut materials," *CIRP Annals*, vol. 69, no. 1, pp. 73–76, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.CIRP.2020.04.027.
- [24] A. Shokrani, I. Al-Samarrai, and S. T. Newman, "Hybrid cryogenic MQL for improving tool life in machining of Ti-6Al-4V titanium alloy," *J Manuf Process*, vol. 43, pp. 229–243, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2019.05.006.
- [25] M. M. A. Khan, M. A. H. Mithu, and N. R. Dhar, "Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid," *J Mater Process Technol*, vol. 209, no. 15–16, pp. 5573–5583, Aug. 2009, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2009.05.014.
- [26] K. Arul, V. Mohanavel, S. Raj Kumar, T. Maridurai, K. Magesh Kumar, and M. Ravichandran, "Investigation of machining attributes on machining of alloys under nano fluid MQL environment: A review," *Mater Today Proc*, vol. 59, pp. 1312–1318, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.11.525.
- [27] S. Chinchankar, S. S. Kore, and P. Hujare, "A review on nanofluids in minimum quantity lubrication machining," *J Manuf Process*, vol. 68, pp. 56–70, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2021.05.028.
- [28] M. Danish, M. K. Gupta, S. Rubaiee, A. Ahmed, and M. Sarikaya, "Influence of graphene reinforced sunflower oil on thermo-physical, tribological and machining characteristics of inconel 718," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 15, pp. 135–150, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.JMRT.2021.07.161.
- [29] P. Jyothish, V. Vasu, and D. Kashinath, "Experimental investigation study on enhancing the thermal and rheological properties of sunflower vegetable oil with ZnTiO₃, BN, CuO nanofluid for machining of Inconel-718 under

- minimum quantity lubrication (MQL),” *Mater Today Proc*, vol. 59, pp. 1599–1607, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2022.03.147.
- [30] R. Sankaranarayanan, R. J. H. N., S. K. J., and G. M. Krolczyk, “A comprehensive review on research developments of vegetable-oil based cutting fluids for sustainable machining challenges,” *J Manuf Process*, vol. 67, pp. 286–313, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2021.05.002.
- [31] R. A. Kazeem *et al.*, “Advances in the Application of Vegetable-Oil-Based Cutting Fluids to Sustainable Machining Operations—A Review,” *Lubricants*, vol. 10, no. 4, Apr. 2022, doi: 10.3390/LUBRICANTS10040069.
- [32] E. S. Alaba *et al.*, “Evaluation of palm kernel oil as cutting lubricant in turning AISI 1039 steel using Taguchi-grey relational analysis optimization technique,” *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, vol. 6, May 2023, doi: 10.1016/J.AIME.2023.100115.
- [33] M. Manoj, A. Gopal, V. Patil, K. Ashish, S. Saloni, and S. Advitiya, “Modeling And Analysis Of Turning Process On Lathe Machine By Taguchi And Anova Approach,” *International Journal of Scientific & Technology Research*, vol. 18, no. 10, pp. 1466–1470, Oct. 2019, Accessed: Jul. 19, 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/336739367_Modeling_And_Analysis_Of_Turning_Process_On_Lathe_Machine_By_Taguchi_And_Anova_Approach
- [34] J. Núñez, “Caracterización de la calidad superficial de mecanizado en el proceso de cilindrado del Torno ROMI C420,” Feb. 2019, Accessed: Jul. 26, 2023. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19973>

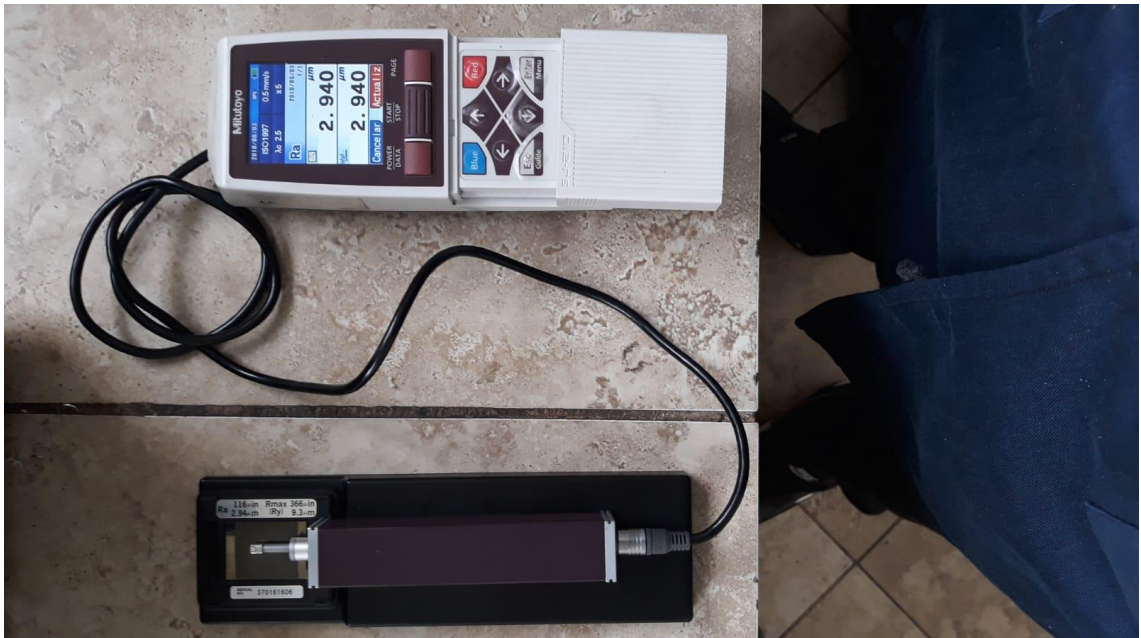
ANEXOS

Anexo 1. Propiedades del material mecanizado.

Property	Value
Tensile Strength, Ultimate	505 MPa
Tensile Strength, Yield	215 MPa
Elongation at Break	70 %
Modulus of Elasticity	193-200 GPa
Poisson's Ratio	0.29
Charpy Impact	325 J
Shear Modulus	86 GPa

Fuente: Investigation of the Process Parameters on the Blanking of AISI 304 Stainless Steel by Using Finite Element Method

Anexo 2. Medición de la rugosidad obtenida en el proceso de torneado



Fuente: Autor

Anexo 3. Proceso de mecanizado criogénico



Fuente: Autor.

Anexo 4. Informe de resultados del análisis de los aceites vegetales

Anexo 5. Plano del elemento mecanizado

INFORME 107 - I - LACBAL - 2023 - 1370

IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE:		INFORMACIÓN GENERAL	
CLIENTE ID:	CAJAS LEMA PATRICIO HERNAN	NÚMERO DE MUESTRAS:	2
LOCALIDAD:	CAMINO EL REY Y MONTES DEL CAJAS	MUESTREADO POR:	Cliente
CORREO ELECTRÓNICO:	pat_2@hotmail.es	N.º PROFORMA:	DQ-P1370-2023
TELÉFONO:	0992907080	N.º FACTURA:	001-003-0079443
		RECEPCIÓN DE LA MUESTRA:	2023-10-16
		ANALIZADO:	Juan Rosas
		INFORME REALIZADO POR:	Melissa Albuja
		ENTREGA DE INFORME	2023-10-20

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA:					
INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE	IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE	CÓDIGO LABORATORIO	TIPO MUESTRA	TIPO ENVASE	CANTIDAD
Aceite de girasol	---	1370-01	Aceite de girasol	Plástico	500 ml
Aceite de oliva	---	1370-02	Aceite de oliva	Plástico	500 ml

CONDICIONES AMBIENTALES:					
TEMPERATURA [°C]	15,0 a 22,0	HUMEDAD RELATIVA [%]	32,0 a 70,0	PRESIÓN [kPa]	72,4 a 73,2

RESULTADOS OBTENIDOS:				
MUESTRA	ENSAYO	NORMA MÉTODO	UNIDADES	VALOR OBTENIDO
1370-01	*Densidad relativa 15,6 °C	ASTM-D1298-12b	kg/m ³	921,5
	Viscosidad cinemática a 40 °C	ASTM-D445	mm ² /s	32,2
	Viscosidad cinemática a 100 °C	ASTM-D445	mm ² /s	7,8
	Índice de viscosidad	ASTM D2270	---	229
	Punto de inflamación copa abierta	ASTM-D92	°C	318,2
1370-02	*Densidad relativa 15,6 °C	ASTM-D1298-12b	kg/m ³	916,1
	Viscosidad cinemática a 40 °C	ASTM-D445	mm ² /s	38,5
	Viscosidad cinemática a 100 °C	ASTM-D445	mm ² /s	8,3
	Índice de viscosidad	ASTM D2270	---	198
	Punto de inflamación copa abierta	ASTM-D92	°C	224,2

** FIN DE LOS RESULTADOS ANALÍTICOS**

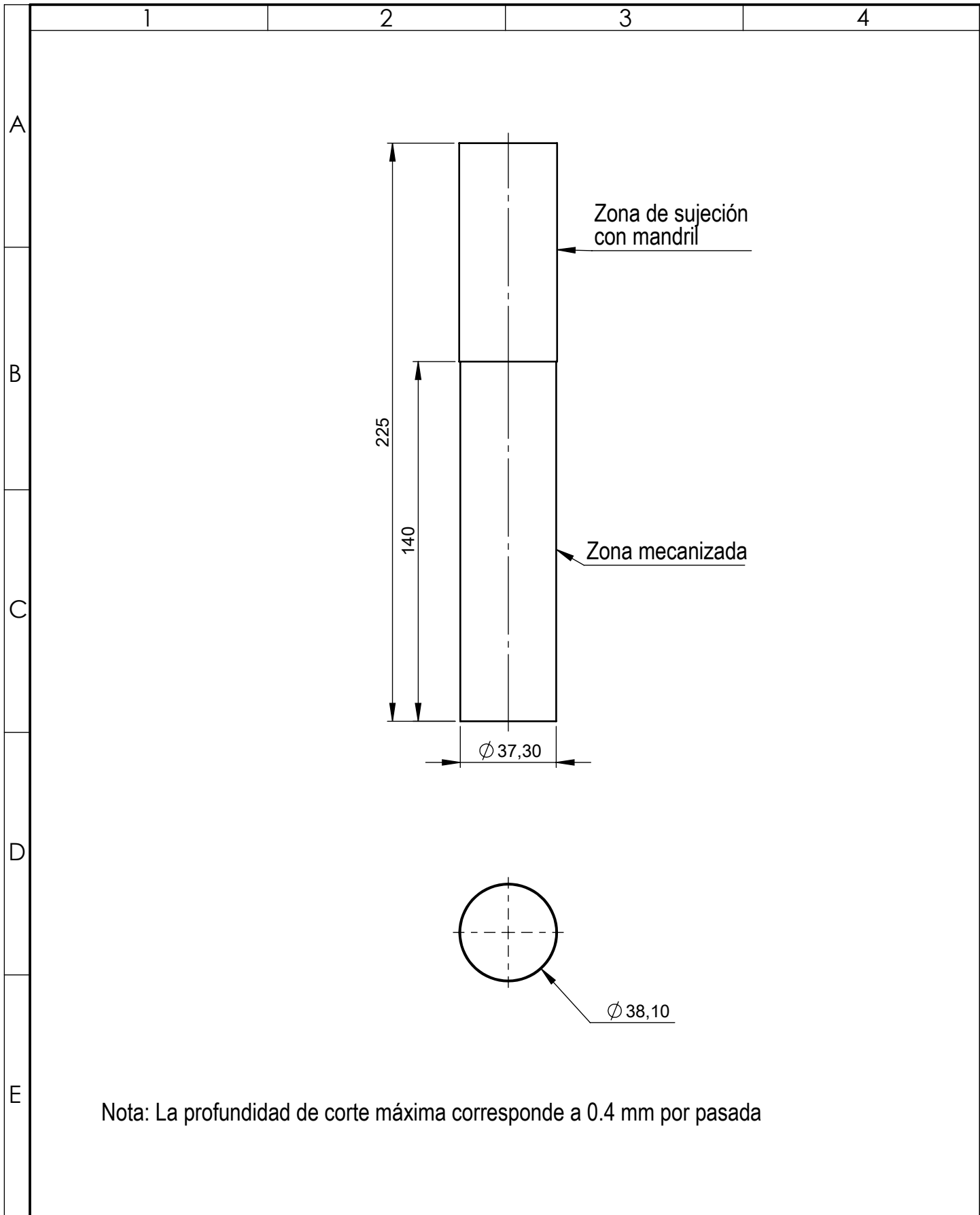


AUTORIZADO Y FIRMADO POR:

MGS. MELISSA ALBUJA
RESPONSABLE TÉCNICO DE LACBAL

NOTAS ACLARATORIAS
1. Todos los parámetros se encuentran dentro del Sistema de Gestión ISO 17025, pero no todos están acreditados.
2. Los métodos que constan de un *, son aquellos métodos acreditados, <u>Acreditación N° SAE LEN 21-002</u>
3. Los resultados reportados en este documento corresponden únicamente a los ítems ensayados según se han recibido o lo contrario.
4. Queda prohibido la reproducción de forma parcial o total del presente informe sin autorización del Laboratorio LACBAL.
5. Cuando aplique, se realizan los ensayos aun sin cumplir con los criterios de aceptación y rechazo de las muestras de objeto de ensayo previa aceptación del cliente, la comparación respectiva con la normativa vigente NTE INEN.
6. El muestreo es responsabilidad del cliente, la Escuela Politécnica Nacional no responde por posibles variaciones ocasionadas por la toma de muestra, los resultados son únicamente de la muestra entregada por el cliente.
7. El laboratorio no cuenta con otras instalaciones, por lo que todas las actividades son realizadas en las instalaciones de LACBAL.
8. En caso de que el laboratorio sea el responsable del transporte de la muestra (convenio suscrito) LACBAL lo realizará de acuerdo a los protocolos establecidos para transporte en la norma ASTM D4057-22.
9. Todos los ensayos se han realizado utilizando la última revisión de los métodos indicados, a menos que se indique lo contrario en el reporte.
10. Las muestra(s) a la que se refieren los resultados obtenidos en el presente documento fueron tomadas por el cliente o por un tercero que actúa bajo la dirección del cliente.





Nota: La profundidad de corte máxima corresponde a 0.4 mm por pasada

				Tolerancia:	Peso [g]:	Material:	
				± 0.5	1999.105	ASTM A36 Acero	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 2/2/2024	Patricio Cajas		
				Revisó:	Ing. Diego Núñez		
				Aprobó:	Ing. Diego Núñez	No. de lámina:	Registro:
				FICM U.T.A.			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	INGENIERÍA MECÁNICA		(Sustitución)	