

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA MECÁNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIEROS MECÁNICOS**

**TEMA:
ANÁLISIS COMPARATIVO DEL ACABADO SUPERFICIAL EN
ALEACIÓN DE ALUMINIO 7075-T6 PARA UN PROCESO DE
MECANIZADO CNC ENTRE UN SISTEMA DE LUBRICACIÓN DE
MÍNIMA CANTIDAD HASTA 50 ML/H Y UN SISTEMA DE
LUBRICACIÓN POR INUNDACIÓN.**

**AUTORES:
FREDDY SEBASTIÁN NICOLALDE SUBÍA
MARIO AMADOR TUTILLO OÑA**

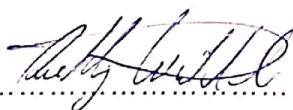
**TUTOR:
RENÉ PATRICIO QUITIAQUEZ SARZOSA**

Quito, agosto del 2019

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTORES

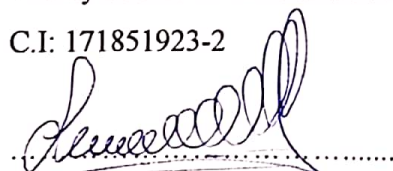
Nosotros, Freddy Sebastián Nicolalde Subía con C.I. 171851923-2 y Mario Amador Tutillo Oña con C.I. 172650997-7, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud que somos autores del trabajo de titulación intitulado: “ANÁLISIS COMPARATIVO DEL ACABADO SUPERFICIAL EN ALEACIÓN DE ALUMINIO 7075-T6 PARA UN PROCESO DE MECANIZADO CNC ENTRE UN SISTEMA DE LUBRICACIÓN DE MÍNIMA CANTIDAD HASTA 50ML/H Y UN SISTEMA DE LUBRICACIÓN POR INUNDACIÓN”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingenieros Mecánicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Freddy Sebastián Nicolalde Subía

C.I: 171851923-2



Mario Amador Tutillo Oña

C.I: 172650997-7

Quito, agosto del 2019

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto Técnico, “ANÁLISIS COMPARATIVO DEL ACABADO SUPERFICIAL EN ALEACIÓN DE ALUMINIO 7075-T6 PARA UN PROCESO DE MECANIZADO CNC ENTRE UN SISTEMA DE LUBRICACIÓN DE MÍNIMA CANTIDAD HASTA 50 ML/H Y UN SISTEMA DE LUBRICACIÓN POR INUNDACIÓN”, realizado por Freddy Sebastián Nicolalde Subía y Mario Amador Tutillo Oña obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, agosto del 2019



Ing. René Patricio Quitiaquez Sarzosa

CI: 171059726-9

DEDICATORIA

A mi madre que con su temprana partida se convirtió en el Ángel que guía mi camino, gracias a su amor incondicional, fortaleza, virtudes y valores que me inspiran a luchar y seguir adelante; a mi tía Rosa Subía que con cariño, paciencia y esfuerzo es el pilar fundamental para culminar este grandioso sueño.

Freddy Nicolalde

A Dios, el cual me ha dado la vida y el placer de poder conocer a personas las cuales siempre estarán presentes en las etapas más importantes de mi vida; mis padres que con su amor y su gran esfuerzo me han ayudado a cumplir una meta más en mi vida y a mis abuelitos que con su gran amor y palabras de motivación me han ayudado a sobresalir y poder alcanzar esta meta súper importante en mi vida.

Mario Tutillo

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento especial a la Universidad Politécnica Salesiana por todo el apoyo en el transcurso del desarrollo de este proyecto.

A nuestro tutor el Ing. Patricio Quitiaquez, que con su tiempo y amplio conocimiento supo ayudarnos y guiarnos en el desarrollo de nuestro proyecto.

A los Ingenieros Xavier Vaca y Vinicio Coque, por todo su tiempo brindado y su conocimiento los cuales supieron ayudarnos para poder alcanzar nuestro objetivo.

ÍNDICE GENERAL

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	i
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN.....	xiii
OBJETIVOS.....	xiv
CAPÍTULO I.....	1
GENERALIDADES	1
1.1. Aleación de aluminio 7075-T6 (Prodax)	1
1.1.1. Características Aleación Prodax.....	3
1.1.2. Mecanizado Aleación Prodax.....	3
1.1.3. Mecanizado de alta velocidad	4
1.1.4. Factores de Mecanizado.....	4
1.1.5. Mecanizado Prodax	8
1.2. MQL (Mínima Cantidad de Lubricante).....	9
1.2.1. Tipos de Fluido de Corte.....	10
1.2.2. Aceites de Corte	10
1.2.3. Taladrinas.....	10
1.2.4. Suministro de fluido de corte por inundación.....	12
1.2.6. Tipos de Sistemas MQL.....	13

1.2.7.	Consumo de lubricante en la técnica MQL.....	14
1.3.	Tipo de Maquinado.....	15
1.3.1.	Parámetros de Corte para Operaciones de Fresado	15
1.3.2.	Velocidad de Corte (VC).....	15
1.3.4.	Profundidad de pasada axial a_p y radial $[a_e]$	17
1.3.5.	Velocidad de remoción del material [MRR].....	17
1.3.6.	Rugosidad.....	18
CAPÍTULO II.....		20
GENERALIDADES		20
2.1.	Diseño y construcción del equipo MQL implementado para un centro de mecanizado CNC	20
2.1.1.	Componentes del sistema MQL	21
2.2.	Parámetros de funcionamiento	28
2.3.	Planos.....	28
2.4.	Metodología de la experimentación.....	29
2.4.1.	Selección del diseño experimental para el análisis de la rugosidad superficial.	29
2.4.2.	Método Taguchi.....	30
2.4.3.	Aplicación del Método Taguchi	30
2.5.	Parámetros de maquinado	33
2.5.1.	Herramienta.....	33
2.5.2.	Cálculo de parámetros de corte	33
2.6.	Plan de desarrollo de la experimentación	34
2.7.	Desarrollo	37
2.7.1.	Dimensionamiento y preparación de las probetas de Aluminio 7075 T6..	37
2.7.2.	Selección de la herramienta para desbaste por fresado de planeado.	37

2.7.3.	Selección del lubricante	37
2.7.4.	Instalación del sistema MQL en el centro de mecanizado CNC.....	40
2.7.5.	Selección de los parámetros de corte.....	40
2.7.6.	Programación del centro de mecanizado	42
2.7.7.	Estrategia de mecanizado.....	42
2.7.8.	Medición de valores de rugosidad Ra.....	42
2.7.9.	Procedimiento para la toma de valores de rugosidad Ra	43
2.7.10.	Valores de rugosidad obtenidos para Desbaste Profundidad 2mm.....	44
2.7.11.	Valores de rugosidad obtenidos para Acabado Profundidad 0,3 mm. ...	46
CAPÍTULO III		49
ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA CALIDAD SUPERFICIAL Y ANÁLISIS ECONÓMICO.....		49
3.1.	Análisis de resultados	49
3.2.	Resultados obtenidos en el acabado superficial por desbaste entre un sistema MQL y un sistema por inundación.....	49
3.3.	Resultados obtenidos en el acabado superficial entre un sistema MQL y un sistema por inundación.....	53
3.4.	Análisis económico.....	56
3.4.1.	Costos directos	57
3.4.2.	Costos indirectos	58
3.4.3.	Costo total	58
CONCLUSIONES		59
RECOMENDACIONES		61
REFERENCIAS		62
ANEXOS		

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del sistema de lubricación interna por cantidades mínimas.....	13
Figura 2. Suministro externo del refrigerante mediante MQL.....	14
Figura 3. Avance por filo f_z en una operación de fresado en concordancia	16
Figura 4. Esquema de corte de la herramienta	17
Figura 5. Escala descriptiva de observación para determinar la rugosidad	18
Figura 6. Esquema del sistema MQL.....	21
Figura 7. Dispositivo MQL	21
Figura 8. Regulador de presión	22
Figura 9. Electroválvula	22
Figura 10. Bomba Peristáltica	23
Figura 11. Regulador de velocidad.....	23
Figura 12. Convertidor de Voltaje	23
Figura 13. Manguera articulada.....	24
Figura 14. Boquilla de pulverización	25
Figura 15. Accesorios líneas de aire	25
Figura 16. Manguera línea de aceite 4mm.....	26
Figura 17. Switch on/ off	26
Figura 18. Depósito de aceite.....	27
Figura 19. Carcasa acrílico.....	27
Figura 20. Adaptador de corriente.....	28
Figura 21. Esquema general del diseño experimental para evaluar la integridad de la superficie en el fresado por planeado de la aleación de Aluminio 7075-T6.....	29
Figura 22. Tres partes principales de la aplicación de la técnica Taguchi.....	30
Figura 23. Herramienta seleccionada.....	33
Figura 24. Diagrama para el desarrollo de la investigación comparativa.....	35
Figura 25. Diagrama para el desarrollo de la investigación comparativa.....	36
Figura 26. Elaboración de probetas	37
Figura 27. Fluido de corte	38
Figura 28. Lubricante para el sistema por inundación.....	39

Figura 29. Instalación del equipo MQL	40
Figura 30. Trayectoria de Mecanizado de X a Y.....	42
Figura 31. Dispositivo medidor de rugosidad	43
Figura 32. Medición de Rugosidad.....	43
Figura 33. Toma de medidas de rugosidad para desbaste (Probetas)	44
Figura 34. Toma de medidas de rugosidad para acabado (Probetas)	46
Figura 35. Acabado superficial de probetas mecanizadas con diferentes sistemas de lubricación.....	49
Figura 36. Acabado superficial en desbaste con MQL a 50 ml/h	51
Figura 37. Acabado superficial en desbaste con Mql a 25 ml/h.....	51
Figura 38. Acabado superficial en desbaste con sistema por inundación.....	52
Figura 39. Comparativo del acabado superficial por desbaste de probetas mecanizadas con diferentes sistemas de lubricación.....	52
Figura 40. Acabado superficial con Mql a 50 ml/h	54
Figura 41. Acabado superficial en desbaste con Mql a 25 ml/h.....	55
Figura 42. Acabado Superficial con un sistema por inundación	55
Figura 43. Análisis comparativo del acabado superficial de probetas mecanizadas con diferentes sistemas de lubricación	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Identificación de las aleaciones de aluminio	2
Tabla 2. Composición aluminio 7075-T6	2
Tabla 3. Características Prodax	3
Tabla 4. Definición de variables independientes	5
Tabla 5. Definición de variables dependientes	6
Tabla 6. Factores que influyen en el mecanizado	7
Tabla 7. Velocidades y avances de corte recomendado en el proceso de planeado para aluminio 7075 con herramientas de carburo	8
Tabla 8. Fresado de Acabado	8
Tabla 9. Ventajas y desventajas de los fluidos de corte	11
Tabla 10. Características de los lubricantes (taladrina y aceite biodegradable)	15
Tabla 11. Especificaciones de rangos de rugosidades	19
Tabla 12. Determinación de factores y niveles.....	31
Tabla 13. Matriz ortogonal L9.....	32
Tabla 14. Diseño experimental según la matriz ortogonal L9.....	32
Tabla 15. Cálculo número de revoluciones	33
Tabla 16. Cálculo velocidad de avance por diente.	34
Tabla 17. Datos Técnicos de Corte	38
Tabla 18. Datos Técnicos Lubricante	39
Tabla 19. Selección Parámetros de corte desbaste	40
Tabla 20. Selección Parámetros de corte acabado	41
Tabla 21. Especificaciones del Rugosímetro.....	43
Tabla 22. Tabla valores de rugosidad (proceso de desbaste con profundidad de 2mm). 45	
Tabla 23. Tabla valores de rugosidad (proceso de acabado con una profundidad de 0,3mm)	47
Tabla 24. Datos obtenidos en la experimentación (Desbaste).....	50
Tabla 25. Datos obtenidos en la experimentación (Acabado).....	53
Tabla 26. Análisis económico costos directos.....	57
Tabla 27. Análisis económico costos indirectos.....	58
Tabla 28. Balance Final.....	58

RESUMEN

En la actualidad, la necesidad de procesos de mecanizado eficiente y amigable con el medio ambiente ha incrementado sustancialmente en términos de productividad y ecoeficiencia. Basados en dichas premisas la presente investigación describe la implementación de un sistema de mínima cantidad de lubricante que funciona mediante la pulverización de la mezcla aire-lubricante a presión constante de 4 bares, con caudales establecidos para la investigación en 25 ml/h y 50 ml/h los cuales fueron comparados con un sistema de lubricación por inundación a 3,5 bares de presión y caudal 15 l/min; para la obtención de resultados se establecieron parámetros de corte constantes.

Aplicando el método estadístico de Taguchi se determinó la aplicación de la matriz ortogonal L9 la cual reduce a 9 evaluaciones experimentales por cada tipo de mecanizado en este caso desbaste y acabado superficial.

Después de llevar a cabo las experimentaciones en el centro de mecanizado vertical marca EMCO Concept Mill 260, se tomaron medidas de rugosidad con el equipo Mitutoyo SJ 210, determinando que la implementación del sistema MQL mejora la rugosidad superficial Ra de la aleación de aluminio 7075-T6 en el acabado, debido a que el valor de esta, disminuye en 36 % y 12 % para el sistema MQL de 50 y 25 ml/h respectivamente, al ser comparados con un sistema por inundación; caso contrario ocurre en el fresado por desbaste en el cual los valores de Ra son favorables para el sistema tradicional en un 60 % con respecto al sistema MQL.

Palabras clave: Sistema de lubricación MQL, fresado, rugosidad superficial, parámetros de corte, aleación de aluminio.

ABSTRACT

Today, the need for efficient processes and machining friendly to the environment has increased substantially in terms of productivity and eco-efficiency. Based on these premises the present investigation describes the implementation of a minimum amount of lubrication which consists of spraying the air-lubricant mixture at constant pressure of 4 bar, with flow rates established for the investigation in 25 ml/h 50 ml/h of the same were compared with lubrication system flood at 3,5 bar pressure and flow 15 l/min; for obtaining constant.

Applying the statistical method of Taguchi application L9 orthogonal matrix which reduces to 9 experimental evaluations for each machining type in this case grinding and surface finish it was determined.

After carrying out each of the experiments in the vertical machining center mark EMCO Concept Mill 260, Roughness measurements were taken with the equipment Mitutoyo SJ 210, reaching determining that implementation of the MQL improves the surface roughness Ra of the aluminum alloy 7075-T6 in the finish due to the value of this, decreases by 36 % and 12 % for the lubrication system MQL 50 and 25 ml/h respectively, when compared with a system by flooding; otherwise it occurs in the roughing milling in which Ra values are favorable for the traditional system by 60 % over the MQL.

Keywords: Lubrication system MQL, Milling, Surface roughness, Cutting parameters, Aluminium alloy.

INTRODUCCIÓN

En el mecanizado es habitual utilizar refrigerantes o lubricantes ya que cumplen con el objetivo de refrigerar la herramienta. Sin embargo, en muchos casos el uso de estos fluidos de corte no es justificado en el proceso y es común utilizarlo sin ningún criterio ni cálculo previo. [1]

El factor ambiental es el más perjudicado con el uso de estos refrigerantes, ya que estos una vez que alcanzan su vida útil son desechados y a la larga terminan en ríos o recursos naturales. Además, el uso de refrigerantes implica complicaciones de salud en los operadores como daños en la piel e inflamación, trastornos respiratorios, trastornos gastrointestinales y otras afecciones. [1]

Por lo general, los fluidos de corte representan aproximadamente el 15 % de los costos de fabricación. Por lo tanto, el uso de estos refrigerantes afecta significativamente a la industria metalmeccánica en aspectos ambientales, económicos, de eficiencia y salud. [2]

Con la implementación de un sistema micro pulverización de lubricante o Mínima Cantidad de Lubricante (MQL), se minimizará el consumo de refrigerante en el mecanizado. [2]

Es necesario realizar ensayos experimentales en operaciones de mecanizado y de esta manera poder evidenciar el resultado del acabado superficial utilizando una técnica MQL en comparación a el resultado de un mecanizado con refrigerante por inundación. [2]

OBJETIVOS

Objetivo General

- El objetivo general de la investigación del trabajo de titulación es analizar comparativamente el acabado superficial en Aleación de Aluminio 7075-T6 para un proceso de mecanizado CNC entre un sistema de lubricación de mínima cantidad hasta 50 ml/h y un sistema de lubricación por inundación.

Objetivos Específicos:

- Diseñar y construir un sistema de mínima cantidad de lubricación (MQL) con una capacidad máxima de 50 ml/h.
- Identificar la mínima cantidad de lubricación requerida para un proceso de fresado por planeado y la implicación de su uso en un centro de mecanizado.
- Identificar la relación entre la cantidad de lubricante y el parámetro de rugosidad en un sistema de mínima cantidad de lubricación.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo el análisis comparativo del acabado superficial en aleación de aluminio AA 7075 T6 (Prodax), para un proceso de mecanizado CNC, entre un sistema de lubricación de mínima cantidad (MQL) hasta 50 ml/h y un sistema de lubricación por inundación; la misma que se llevará a cabo a partir de la implementación de un sistema MQL externo, para la posterior comparación con un sistema de lubricación por inundación, mediante la realización de ensayos experimentales, en operaciones de mecanizado por fresado en planeado para desbaste y acabado, con cada uno de los métodos de lubricación previamente mencionados y de esta manera comparar los resultados obtenidos en el acabado superficial, por medio de la medición de rugosidad superficial Ra, obtenida con cada tipo de sistema de lubricación. Para la elaboración de las probetas se utilizará el material aluminio AA 7075-T6 (Prodax) que es muy utilizado en la industria metalmecánica, debido a su alta resistencia, bajo peso y facilidad para los procesos de mecanizado, por lo que es preciso el uso de una apropiada refrigeración en el proceso de mecanizado.

1.1. Aleación de aluminio 7075-T6 (PRODAX)

La aleación de aluminio 7075 – T6 conocido dentro de la industria metalmecánica como aluminio (Prodax) se caracteriza por tener una alta conductividad térmica, así como un bajo peso el cual es ideal para el mecanizado a altas velocidades y para la utilización de sistemas de refrigeración más sencillos. [1]

Dentro de la industria hoy en día la aleación de aluminio (Prodax) se ha implementado intensamente específicamente las aleaciones 2 xxx, 6 xxx y 7 xxx, en dichas aleaciones se ha sustituido el acero, así como las fundiciones de hierro. [2]

La aleación de aluminio 7075-T6 de manera general se aplica para la elaboración de ejes que son para maquinarias estándar, así como para aplicaciones de micro maquinado. [2]

La Tabla 1 muestra la codificación para la identificación de las aleaciones de aluminio en donde se emplea designaciones numéricas de cuatro dígitos para poder identificarlas. En

donde el primer término señala el tipo de aleación; el segundo término señala los límites de impurezas mientras que los dos últimos términos señalan el tipo de aleación de aluminio. [3]

Tabla 1. Identificación de las aleaciones de aluminio [3]

TIPO	Principales elementos Aleables
1XXX	Aluminio 99 % puro (no tratable térmicamente)
2XXX	Cobre (térmicamente tratable)
3XXX	Manganeso (no tratable térmicamente)
4XXX	Silicio (no tratable térmicamente)
5XXX	Magnesio (no tratable térmicamente)
6XXX	Magnesio y Silicio (térmicamente tratable)
7XXX	Zinc (térmicamente tratable)
8XXX	Otros elementos
9XXX	No usado

Actualmente el aluminio 7075 – T6 (Prodax) es un material de referencia en la industria por sus excelentes propiedades de resistencia mecánica y química frente a la corrosión. [3]

El mecanizado en aluminio Prodax tiene un gran interés en la industria tanto en moldes y matrices debido a su alta resistencia mecánica y bajo peso.

En la Tabla 2 se describe la composición nominal.

Tabla 2. Composición aluminio 7075-T6 [4]

Elemento	Mínimo (%)	Máximo (%)
Silicio	-	0.4
Hierro	-	0.5
Cobre	1.2	2.0
Manganeso	-	0.3
Magnesio	2.1	2.9
Cromo	0.18	0.28
Zinc	5.1	6.1

1.1.1. Características Aleación Prodax

La utilidad del Prodax se ve reflejado especialmente en moldes para plásticos y matrices gracias a sus características de excelente mecanizado a altas velocidades, así como su alta conductividad térmica por lo que se puede utilizar sistemas de enfriamiento más sencillos y tratamientos superficiales las que se pueden observar en la Tabla 3. [5]

Tabla 3. Características Prodax [5]

Tipo	Descripción
Excelente mecanizado	Altas velocidades de corte, tiempos de mecanizado reducidos, menos costo de herramienta, entregas más rápidas.
Bajo peso	Bajo peso en relación de 1 a 3 respecto al acero lo que hace que el manejo de la herramienta sea más fácil y sencillo. Debido a su baja inercia es posible acelerar el tiempo de cierre y apertura de moldes.
Alta conductividad térmica	En si reduce el tiempo de los ciclos por lo que se puede utilizar sistemas de enfriamiento más sencillos.
Buena estabilidad	Garantiza una deformación mínima durante y luego del mecanizado.
Buena resistencia a la corrosión	Se caracteriza por tener una buena resistencia contra todos los plásticos utilizados habitualmente.
Apropiado para tratamientos superficiales	Prodax el más adecuado para realizar cromado duro o niquelado para así incrementar su dureza, resistencia al desgaste y a la corrosión.

1.1.2. Mecanizado Aleación Prodax

En cuanto al mecanizado se lo considera como un proceso en el cual se obtiene un elemento o parte con geometría y forma precisa, al retirar el material de las distintas

superficies de una pieza de trabajo mediante la producción de viruta [5]. El concepto más general que se le puede dar al mecanizado de alto rendimiento (MAR) el cual hace referencia a toda la tecnología del arranque de viruta en donde se mejora la productividad que es considerada como la cantidad de material eliminado en una unidad de tiempo. En donde recomienda realizar el proceso de mecanizado en donde no exista un desgaste excesivo de la herramienta. [5]

1.1.3. Mecanizado de alta velocidad

El mecanizado de alta velocidad se caracteriza por mantener la sección de viruta, es decir el avance por diente así como las condiciones de inmersión (profundidad de pasada), e incluso reducen en una gran medida, en donde se produce una elevación en la velocidad de corte sobre la normal. Al tomar en cuenta el concepto de Mecanizado de Alta Velocidad, se podría decir que actualmente ningún proceso de mecanizado se lo realiza a alta velocidad, aunque todos los productores de máquinas aseguran que la mayoría de sus fresadoras pueden realizar cualquier tipo de mecanizado a alta velocidad. [5]

En materiales como el acero, titanio y materiales de difícil mecanizado el principal problema es no utilizar el mecanizado a alta velocidad, en donde las velocidades de corte que se aplican en la actualidad son superiores que las llamadas convencionales en donde no se produce una variación elevada de mecanismos intrínsecos los cuales están asociados a la formación de la viruta. [5]

El mecanizado en aleaciones de aluminio es sin duda el más cercano al concepto físico de alta velocidad, dado que las velocidades de corte pueden llegar a ser de valor de 2000 m/min o superiores, cuando se emplean herramientas del tipo platos de fresar de diámetro superiores a 50 mm. A esta velocidad la forma de generarse la viruta cambia respecto a la convencional. [5]

1.1.4. Factores de Mecanizado

Existen varios factores que influyen en el resultado final de la manufactura de un elemento mecanizado a los cuales se los conoce como variables dependientes e independientes. En el caso de las variables independientes que se muestran en la Tabla 4, en las cuales el operador de la máquina herramienta es quien tiene el control directo sobre las mismas,

especificando y configurando el proceso de mecanizado. En la Tabla 5 se observa las variables dependientes, las cuales son consecuencia de la interacción de las variables. [5]

Tabla 4. Definición de variables independientes [5]

Variables Independientes	Definición
Material y recubrimientos de la herramienta	<p>Los tres materiales de las herramientas de corte más utilizados en procesos para operaciones de producción son el acero de alta velocidad (HSS), carburo y titanio.</p> <p>La selección adecuada del material para la herramienta de corte la que proporciona un servicio fiable sin dejar de cumplir sus requisitos funcionales sigue siendo un arte.</p>
Forma, acabado superficial y filo de la herramienta	<p>Las herramientas de corte usualmente diseñadas para cumplir operaciones específicas, así como la geometría de la herramienta (ángulos de corte, alivio y salida) esta seleccionada para cumplir con funciones específicas de maquinado.</p>
Material y condiciones de la pieza de trabajo.	<p>La química y la metalurgia de la pieza de trabajo están especificadas o ya se conocen. A menudo el material es seleccionado para una aplicación en particular.</p>
Avance, velocidad y profundidad de corte	<p>Cada operación de maquinado es necesario seleccionar la velocidad de corte, avance y una profundidad de corte.</p> <p>La mayoría de los factores para la sección de los valores de estos parámetros afectan en estas decisiones por lo que todas las variables dependientes son influenciadas por ellas.</p>
Fluidos de corte	<p>La correcta selección del fluido de corte para una combinación particular de trabajo, así como el</p>

material y la herramienta puede significar una diferencia entre una buena operación o el fracaso de todos los procesos de producción.

Características de la máquina herramienta	Se relaciona a las especificaciones técnicas de la máquina herramienta a utilizar entre los más importantes están la velocidad de husillo máxima, la potencia máxima y la versatilidad de la máquina.
--	---

Tabla 5. Definición de variables dependientes [5]

Variables dependientes	Definición
Tipo de viruta producida	Las clases de virutas metálicas que suelen verse principalmente en las prácticas fotomicrograffas en los mismos metales son: continúa de borde acumulado, aserrada, discontinua.
Fuerza y energía disipada durante el corte	En una máquina, se produce fuerzas de corte por lo que consume energía. Un cambio en los parámetros de corte y fluido de corte, puede alterar estas fuerzas generadas, pero el cambio es indirecto, en la que el ingeniero no específico estas fuerzas, sólo los parámetros que la generan.
Elevación de la temperatura en la pieza de trabajo, la herramienta y la viruta	Debido por la fricción de la herramienta con el material se produce un aumento de temperatura, la fricción y la deformación plástica en el mecanizado produce un calor considerable, que eleva la temperatura de la herramienta por lo que reduce su resistencia al desgaste.
Acabado superficial e integridad de la superficie de la pieza de trabajo	Describe las características geométricas de una superficie. En la que las superficies rugosas tienen mayor variabilidad que las superficies lisas.

Luego de identificar las variables independientes y dependientes se definirán los factores los cuales influyen en el mecanizado tal como se lo observa en la Tabla 6.

Tabla 6. Factores que influyen en el mecanizado [5]

Factores	Influencia y relación
Velocidad de corte, profundidad de corte, avance, fluidos de corte.	Fuerzas, potencia, elevación temperatura, vida útil de la herramienta, tipo de viruta, acabado e integridad superficial.
Ángulos de herramienta	Influencia en la dirección del flujo de la viruta; resistencia al desgaste y astillado de la herramienta.
Viruta continua	Fuerzas estables de corte, en particular en maquinaria automatizada, así como un buen acabado superficial.
Viruta de borde acumulado o recrecido	El borde acumulado puede proteger las superficies de la herramienta, acabado e integridad superficial deficientes si es delgada.
Viruta discontinua	Puede afectar el acabado superficial y provocar vibración y traqueteo, es deseable para facilitar la disposición de la viruta; fuerzas fluctuantes de corte.
Elevación de la temperatura	Puede provocar daño térmico a la superficie de la pieza de trabajo, influye en la vida útil de la herramienta en particular en la precisión dimensional de la pieza de trabajo.
Maquinabilidad	Relacionada con la vida útil de la herramienta, el acabado superficial, las fuerzas la potencia y el tipo de viruta.

1.1.5. Mecanizado Prodax

En las Tabla 7 y 8 se observa las velocidades y avances de cortes recomendados para el proceso de planeado para la aleación (Prodax) en donde se debe considerar como valores de guía tales como: la velocidad, avance y profundidad de corte, sin embargo esta investigación se centra en el efecto de emplear distintos sistemas de lubricación, por lo cual estos valores serán acoplados a las condiciones existentes. [6]

Tabla 7. Velocidades y avances de corte recomendado en el proceso de planeado para aluminio 7075 con herramientas de carburo [6]

Material (Dureza)	Herramienta de acero Rápido			Herramienta de Carburo			
	Profundidad de corte (mm)	Velocidad de Corte (m/min)	Avance por diente (mm)	Material	Velocidad de corte (m/min)	Avance por diente (mm)	Material
Al 7075	1	365	0,25	S4,S2	610	0,25	K10, M20
	4	245	0,4	S4,S3	550	0,5	K10, M21
	8	200	0,5	S4,S4	365	0,65	K10, M22

Tabla 8. Fresado de Acabado [7]

Fresado de Acabado	Placa sólida de metal duro	Inserto indexable de metal duro	Acero rápido
Velocidad de corte (Vc)			
m/min	300-500	300-500	120-250
r.p.m.	990-1650	990-1650	400-825
Avance (fz)			
mm/diente	0,03-0,20	0,08-0,20	0,05-0,35
pulg/diente	0,001-0,008	0,003-0,008	0,002-0,014
Designación de metal duro ISO	K20	K20	-

1.2. MQL (Mínima Cantidad de Lubricante)

El sistema MQL, también conocido como micropulverización de lubricante trabaja con una entrada de aire a presión, en donde se inyecta una mezcla aire y aceite pulverizado en la zona de corte. La principal característica es reducir la utilización del refrigerante durante el mecanizado. [8] Hoy en día las operaciones de mecanizado son empleadas cada vez más, utilizando la técnica de mínima cantidad de lubricante (MQL) que actúa sobre el principio de usar pequeñas cantidades de aceite sin desperdicio cuya función está asegurada por la lubricación y refrigeración debido a la mezcla aire comprimido aceite [8]. El interés de reducir el consumo de taladrina se refleja en referencias, donde se muestra la eliminación de refrigerantes después de su uso se reduce el 10 % de los costos de producción. Por lo tanto, el MQL es una técnica conocida como mecanizado ecológico o mecanizado ecoeficiente. [8]

En el procedimiento de mecanizado se obtiene una elevada cantidad de calor lo cual es ocasionado por la deformación plástica del metal originada en llamada zona de corte, así como la fricción de la viruta la cual se mueve por encima de la superficie de desprendimiento de la herramienta. [9] Tanto la temperatura como la fricción ocasionan un desgaste de la herramienta por lo que se obtiene un acabado superficial bajo así como un trabajo inexacto. La aplicación de los fluidos de corte en las operaciones de mecanizado se lo utiliza para así poder disminuir los efectos negativos debidos al calor y a la fricción sobre las piezas y herramientas. [9] De esta manera parte del calor generado se elimina a través del medio ambiente y el fluido de corte mientras que el calor sobrante es eliminado en casi su totalidad por la viruta. Sin embargo, se considera que tanto la herramienta como la pieza que es mecanizada eliminan también parte del calor. [9]

Mediante este modo el sistema de mínima cantidad de lubricación (MQL) minimizará el consumo de aceite, pero este no impide que la viruta quede impregnada del fluido. Por lo que se obtendrá grandes cantidades de viruta seca las cuales son apropiadas para la venta en el proceso de reciclado en donde se establece que si el valor es menor al 2 % no tiene costo de movilidad de la viruta pero si supera este valor hay que pagar un valor para que movilen la viruta por lo que representa otro costo al ciclo de la vida de la taladrina. [9]

1.2.1. Tipos de Fluido de Corte

Durante el proceso de mecanizado los fluidos de corte son sumamente utilizados debido al arranque de viruta lo que permite lubricar tanto a la herramienta como a la pieza. [9]

Se considera como los principales fluidos de corte para el mecanizado a los siguientes fluidos: los aceites íntegros, las emulsiones oleosas, soluciones semisintéticas y sintéticas. [9]

Se considera a los tres tipos últimos de soluciones acuosas diluidas al 3,5 % las cuales se les conocen como el nombre de taladrinas. [9]

1.2.2. Aceites de Corte

En cuanto a los aceites de corte son utilizados principalmente para las operaciones de mecanizado fuertes en donde se producen elevadas cantidades de viruta. [9] Estos tipos de lubricantes son conocidos también como lubricantes no acuosos los cuales no se disuelven para su aplicación por lo que sufren de un elevado poder de refrigeración, pero se caracterizan por la reducción de la fricción y sobretodo el desgaste abrasivo los cuales son representados por minerales. [9]

1.2.3. Taladrinas

En cuanto a la taladrina es considerada como una solución acuosa que consta de aditivos de presión extrema la cual hace referencia a diferentes tipos de soluciones acuosas con aditivos de extrema presión, emulsiones, antioxidante, inhibidores de corrosión bactericidas, humectantes, antiespumantes, colorantes los cuales se clasifican en tres tipos. [9]

1.2.3.1. Emulsiones de Aceite

Se considera como una emulsión a la mezcla de dos líquidos en este caso agua y aceite [10]. La cual se caracteriza por estar formada en un 60 % por aceites minerales, 20 % por emulgentes y el 20 % restante está dividido entre agua y los aditivos varios como son los anticorrosivos. Este tipo de fluido de corte se caracteriza por presentar un aspecto lechoso y por ser adecuado para las operaciones de mecanizado medio y ligero. [10]

1.2.3.2. Taladrinas sintéticas

Por otra parte las taladrinas sintéticas se caracterizan por tener un excelente enfriamiento y por reducir la niebla en donde el concentrado se diluye al 2,5 % en donde el 1,5 % y el 12 % corresponden al agua mientras que el 15 % pertenece a los anticorrosivos lo que contiene hasta un 25 % de humectantes, y un 10 % de aditivos varios y un 50 % de agua. [10]

Por otro lado, el menor porcentaje de aceite de los fluidos semisintéticos es del 2 % al 30 % con la diferencia a los fluidos sintéticos los cuales no contienen ninguna cantidad de aceite. [11]

En la Tabla 9 se puede observar las ventajas y desventajas de los tipos de fluidos de corte. [11]

Tabla 9. Ventajas y desventajas de los fluidos de corte [11]

Aceite de Corte	Aceite Soluble	Semisintéticos	Sintéticos
Ventajas			
Buena Lubricación	Buena Lubricidad	Buena refrigeración	Excelente
Control de Oxidación	Buena capacidad del refrigerante	Control de oxidación Buen control microbiano	enfriamiento Excelente control microbiano Control de oxidación Inflamable Reduce la niebla y formación de espuma.
Desventajas			
Baja capacidad enfriamiento	Problemas de control de oxidación	Formación de espuma La estabilidad se ve afectada por la dureza del agua	Pobre lubricidad Se contamina fácilmente por otros tipos de fluidos
Peligro Incendio Limitado a baja velocidad y operaciones de corte pesadas	Crecimiento de bacterias Perdidas de evaporación	Fácilmente contaminado por otros fluidos de la máquina	

1.2.3.3. Taladrinas semisintéticas

Este tipo de taladrina se caracteriza por tener una buena refrigeración y control de oxidación. En este caso el concentrado diluye un 4 % en donde el 20 % corresponde al aceite sintético, el 30 % a los emulgentes, el 40% al agua y el 10 % a los aditivos como son los humectantes y bactericidas. [10]

1.2.4. Suministro de fluido de corte por inundación

Este tipo de suministro de fluido de corte por chorro o también conocido como inundación es el método más empleado durante el proceso de mecanizado mediante el cual presenta complicaciones durante el maquinado debido al material y al trabajo con velocidades de corte bajas por lo que se dificulta controlar la viruta lo que ocasiona que la herramienta de corte tenga un desgaste rápido provocando atascamientos y con ello el fallo de la herramienta, así como también puede afectar a la superficie del material como es el problema de ralladuras así como afectar al acabado superficial. [12]

1.2.5. Suministro de fluido de corte por MQL

La alternativa al seleccionar un método sustitutivo al mecanizado con suministro de refrigerante por chorro, es el método de lubricación por mínima cantidad o mecanizado casi seco, el mismo que entre sus objetivos esta reducir el consumo de fluidos de corte, mejorar las condiciones en el reciclaje de residuos de mecanizado, al proporcionar virutas no contaminadas por fluido de corte, convirtiéndolo en amigable para el medio ambiente. [13]

El sistema MQL utiliza una pequeña cantidad la cual es inferior a un caudal de 50 ml/h, dentro del proceso de maquinado es importante el control sobre la cantidad de lubricante puesto que existen distintos tipos de procesos de maquinado que establecen el tipo de fluido de corte el cual puede ser diferente como es el ejemplo del fresado frontal que ocupa una cantidad mínima de lubricante. [14]

Para evitar estos problemas se utilizó un sistema de MQL externo el cual tiene controladores independientes para cada flujo tanto como para el aire y para el aceite el cual equilibrara la cantidad de lubricante requerido para el proceso de mecanizado. [14]

1.2.6. Tipos de Sistemas MQL

Existen dos tipos básicos de sistemas MQL: Por spray (externo) y a través de la herramienta (interno). El sistema de rociado externo consiste en un tanque o depósito de refrigerante que está conectado con tubos equipados con una o más boquillas. El sistema se puede ensamblar cerca o sobre la máquina y tiene flujo de aire y refrigerante ajustable de manera independiente para equilibrar el suministro de refrigerante. Es económico, portátil y adecuado para casi todas las operaciones de mecanizado. [15]

Los sistemas MQL a través de la herramienta están disponibles en dos configuraciones, basado en el método de creación de la niebla aire-aceite. El primero tal como se lo observa en la Figura 1 es el sistema de mezcla externa o de un solo canal, aquí el aceite y el aire se mezclan externamente en donde tienen controladores independientes para cada flujo por lo que son adecuados para ser adaptados a máquinas existentes a través de la capacidad de refrigerante de la herramienta, no hay partes críticas dentro del husillo, su principal desventaja es que la neblina de aceite está sujeta a dispersión y separación durante su desplazamiento desde la boquilla; para minimizar las pérdidas de aceite, se utiliza una neblina de partículas relativamente finas, que a menudo limita la cantidad de lubricación que se puede suministrar a la zona de corte y por consiguiente afecta el rendimiento del proceso de corte. [15]

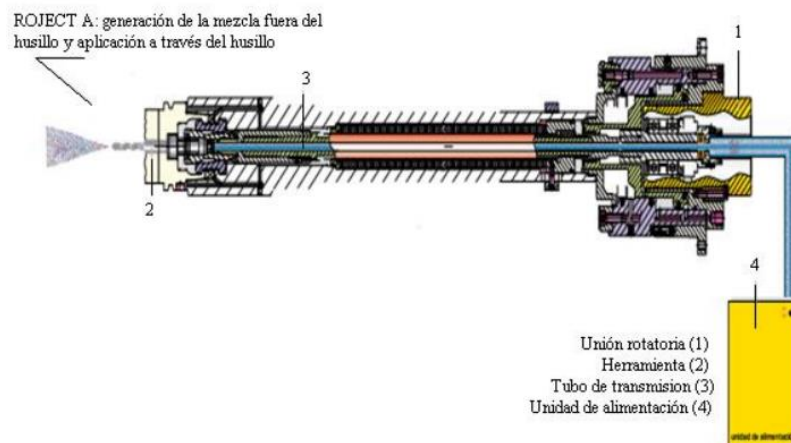


Figura 1. Esquema del sistema de lubricación interna por cantidades mínimas [16]

La segunda configuración como se la observa en la Figura 2 es la mezcla externa o sistemas de dos canales; comúnmente en un sistema de dos canales, dos tubos paralelos se empotran a través del eje para llevar el aceite y el aire a un dispositivo de mezcla externo

cerca del portaherramientas donde se crea la neblina; este enfoque requiere un eje especialmente diseñado, dichos sistemas pueden proporcionar niebla con tamaños de gota más grandes que los dispositivos de mezcla externos, también tienen menos tiempo de demora al cambiar las herramientas entre cortes o la tasa de entrega de aceite durante un corte; sin embargo, los sistemas son más difíciles de mantener y las partes críticas se encuentran dentro del husillo. [15]

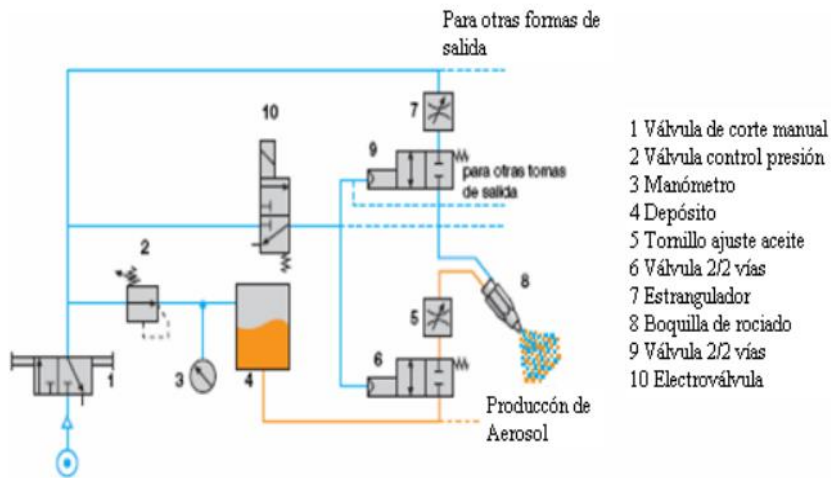


Figura 2. Suministro externo del refrigerante mediante MQL [17]

1.2.7. Consumo de lubricante en la técnica MQL

Los aceites utilizados son ésteres biodegradables y en este caso aleaciones de aluminio como pueden ser alcoholes. Los consumos habituales industrialmente se sitúan entre 0,1 y 0,2 cc/min. Actualmente se emplean aceites sintéticos como alcoholes grasos y aceites éster (aceites vegetales modificados químicamente). El aceite utilizado con el sistema MQL está compuesto por ésteres y sustancias activas sin tener que mezclarse con agua. En la Tabla 10 se observa las características de los aceites de corte. [4]

Tabla 10. Características de los lubricantes (taladrina y aceite biodegradable) [4]

	Aceite para fluido de corte convencional (Taladrina)	Aceite para MQL
Viscosidad (20°)	$68 \frac{mm^2}{s}$	$88 \frac{mm^2}{s}$
Densidad (15°)	$0,88 \frac{g}{cm^3}$	$0,96 \frac{g}{cm^3}$
Calor específico	$1,9 \frac{J}{kg \cdot K}$	$2,0 \frac{J}{kg \cdot K}$
Conductividad Térmica	$0,575 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$	$0,13 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$

1.3. Tipo de Maquinado

La técnica de mínima cantidad de lubricante se aplica el fresado HSM cuyo objetivo de poder incrementar la capacidad de lubricación generalmente para la operación de desbaste y semiacabado en las que se utilizan pequeñas cantidades de lubricante. La aplicación de la mínima cantidad de lubricante (MQL) tiene poca capacidad de refrigeración cuyo objetivo de su aplicación es alcanzar la mínima cantidad de lubricación en la llamada zona de corte para así poder reducir la fluctuación de la temperatura en la herramienta. [18]

1.3.1. Parámetros de Corte para Operaciones de Fresado

En la operación de fresado tanto la velocidad de corte y avance por diente son considerados como los principales parámetros de corte con ellos, el diámetro y el número de dientes de la herramienta queda definido como el proceso y los parámetros de máquina que son velocidad del husillo y el avance lineal. También se calculan otros valores, como la sección de viruta, caudal que son útiles para evaluar el rendimiento del proceso. [8]

1.3.2. Velocidad de Corte (V_c)

También conocida como la velocidad periférica tangencial. El valor se suele dar en m/min. Depende directamente de la velocidad de la máquina y el diámetro de la fresa tal como se puede observar en la ecuación (1). [8]

$$V_c = \frac{\pi \times N \times D}{1000} \quad (1)$$

Donde:

N: las revoluciones del cabezal [rpm]

D: diámetro de la fresa [mm]

V_c : Velocidad de corte [m/min]

1.3.3. Avance por diente (f_z)

Conocido también como avance lineal, se lo considera importante ya que es necesario saber la carga de viruta que recibe cada diente de la fresa. Así se denomina avance por diente a la distancia que recorre un diente al entrar en contacto con el material. Tal como se observa en la Figura 3. En donde se representa esta medida para una operación de fresado en concordancia. Por lo tanto, la velocidad de avance (lineal) de una fresa se puede calcular tal como se indica en la ecuación (2). [8]

$$v_f = f_z \times z \times N \quad (2)$$

Donde:

v_f : velocidad de avance en mm/min, también se denota como F.

f_z : avance por diente en mm/ diente

z: número de dientes

N: velocidad de giro de la fresa en rpm, también denotada como S

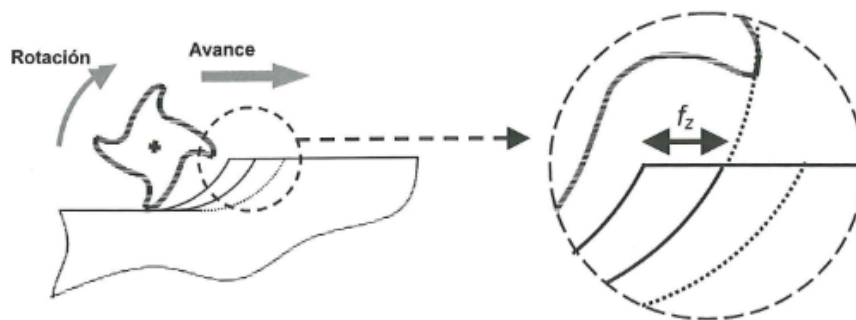


Figura 3. Avance por filo f_z en una operación de fresado en concordancia [8].

Dentro de las operaciones de mecanizado por arranque de viruta son utilizados los fluidos de corte para así poder lubricar y refrigerar la herramienta y a la pieza. [8]

1.3.4. Profundidad de pasada axial [a_p] y radial [a_e]

La penetración axial y radial que la herramienta realiza se denomina a_p y a_e respectivamente como se observa en la Figura 4. [19]

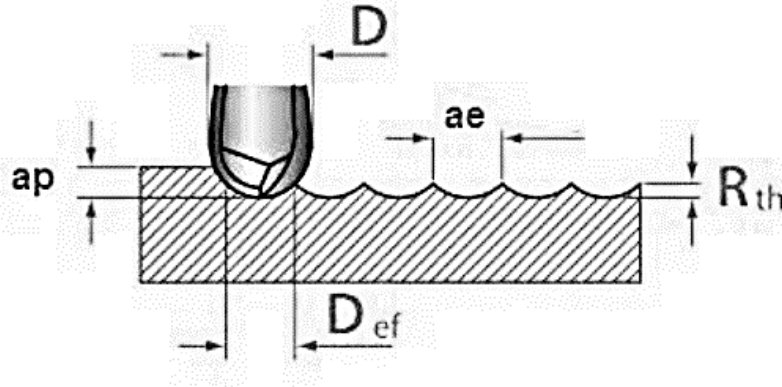


Figura 4. Esquema de corte de la herramienta [19]

En si los fabricantes de las herramientas establecen parámetros de corte óptimos para operaciones de desbaste y acabado, sin embargo para obtener una rugosidad definida en una superficie plana se establece la expresión de penetración radial a_e tal como se puede observar en la ecuación (3). [19]

$$a_e = 2\sqrt{R_{th}(D - R_{th})} \quad (3)$$

Donde:

a_e : Profundidad radial o paso [mm]

R_{th} = altura de la cresta, rugosidad máxima [mm]

1.3.5. Velocidad de remoción del material [MRR]

Este tipo de velocidad se mide como el cociente del material arrancando en una operación entre el tiempo total que ha tardado dicha operación. En si este parámetro permite la evaluación de la productividad. En si el caudal de viruta medio se define tal como se observa en la ecuación (4). [19]

$$MRR = \frac{Vol_{viruta}}{T_{total}} = a_p \times a_e \times V_f \quad (4)$$

Donde:

MRR: Velocidad de remoción de material $\left[\frac{\text{mm}^3}{\text{min}}\right]$

$\text{Vol}_{\text{viruta}}$: Volumen de viruta $[\text{mm}^3]$

T_{total} : Tiempo total de la operación $[\text{min}]$

1.3.6. Rugosidad

En cuanto a la rugosidad es una medida de la forma de las superficies que conforman la discontinuidad. Una clasificación cualitativa de la rugosidad se basa en la observación de la superficie en dos escalas descriptivas. La escala intermedia (varios metros) se divide en tres grados: escalonada, ondulada y plana mientras que la escala pequeña (varios centímetros) divide cada grado de la escala intermedia en: rugosa, lisa y pulida tal como se observa en la Figura 5. [20]

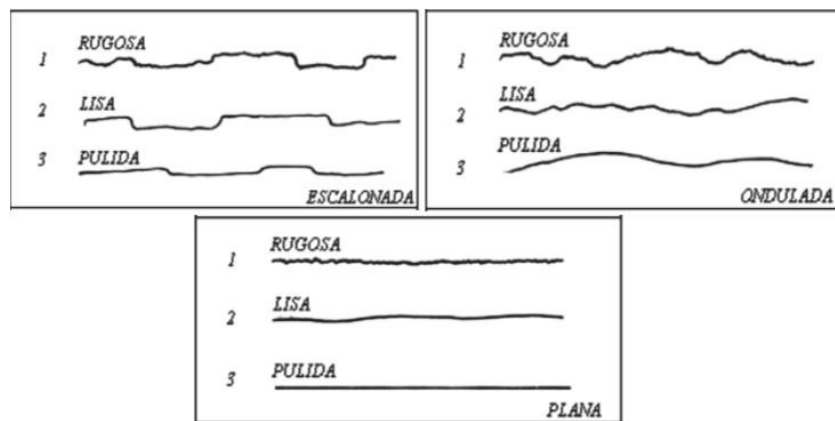


Figura 5. Escala descriptiva de observación para determinar la rugosidad [20]

El método de cálculo se lo puede apreciar en la ecuación (5).

$$R_a = \frac{125 \times f^2}{R} \quad (5)$$

1.3.7. Resistencia al corte de las Discontinuidades

Dentro de las discontinuidades el esfuerzo, la rugosidad, velocidad, orientación, así como la resistencia de los labios de discontinuidad son considerados como los factores más importantes los cuales influyen con todo lo relacionado con el comportamiento de las discontinuidades con relación al esfuerzo cortante. [21]

En la Tabla 11 se puede observar el tipo y los rangos de rugosidades que se pueden llegar a obtener.

Tabla 11. Especificaciones de rangos de rugosidades [22]

Valor Rugosidad R_a(μm)	N° Calidad	Definición aproximada estado superficial
50	N12	Sin rebabas
25	N11	
12,5	N10	Desbastado, marcas apreciadas a vista y tacto.
6,3	N9	
3,2	N8	Fino, marcas visibles poco apreciadas al tacto.
1,6	N7	
0,8	N6	Muy fino, marcas ni visibles ni apreciadas al tacto
0,4	N5	
0,2	N4	Superfino
0,1	N3	
0,05	N2	Superfino
0,025	N1	

CAPÍTULO II

GENERALIDADES

El sistema de mínima cantidad de lubricante o micro pulverización, consiste en la pulverización de gotas de aceite en un chorro de aire comprimido, el cual está dirigido directamente a la zona de corte, muy diferente de la aplicación de refrigerante por inundación convencional, que cubre la zona de corte con fluido. La lubricación está garantizada principalmente por el aceite, y el enfriamiento está garantizado principalmente por el flujo de aire comprimido, la implementación del sistema MQL tiene como propósito minimizará el consumo de refrigerante en operaciones de mecanizado y determinar mediante experimentación las condiciones que favorecen al acabado superficial en el aluminio Produx, en comparación a el resultado de un mecanizado con refrigerante por chorro. [23]

2.1. Diseño y construcción del equipo MQL implementado para un centro de mecanizado CNC

En la investigación, se usó un sistema de lubricación de cantidad mínima externa como sistema de lubricación MQL.

La Figura 6 se muestra el esquema del sistema MQL implementado, en el cual el lubricante (aceite) es conducido desde el depósito a través de la línea de lubricante por medio de una bomba peristáltica (bomba dosificadora), con una tasa de flujo del lubricante entre 0 y 50 ml/h; para posteriormente ser atomizado por el flujo de aire comprimido con presiones de 0 hasta 7 bares, a través de una boquilla de flujo concéntrico triple hasta la zona de contacto pieza-herramienta. [23]

La capacidad de generación del sistema MQL depende de los parámetros presión de aire aplicada y la tasa de flujo del lubricante, los mismos que se puede modificar mediante el regulador de presión y la velocidad de rotación de la bomba (0 – 100 RPM), sin tener que reemplazar otros componentes del equipo. [23]

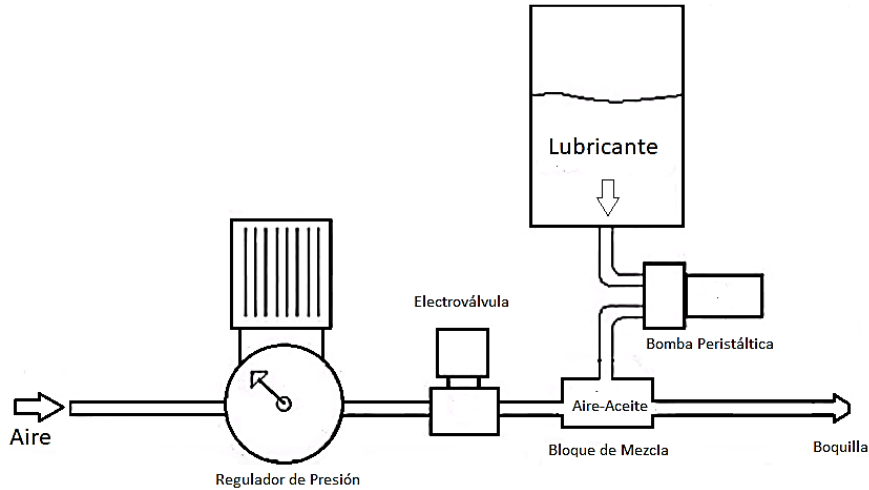


Figura 6. Esquema del sistema MQL. Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

2.1.1. Componentes del sistema MQL



Figura 7. Dispositivo MQL. Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

2.1.1.1. Regulador de presión de aire (0 – 10 bar)

Son considerados como aparatos de control de flujo diseñados para mantener una presión constante de aire en este caso de 0 a 10 bares en el que debe ser capaz de mantener la presión sin afectarse por cambios en las condiciones operativas del proceso para el cual trabaja. [24]



Figura 8. Regulador de presión [24]

2.1.1.2. *Electroválvula (0 – 7 bar)*

Diseñada para controlar el paso del fluido el cual pasa por un conducto o tubería. Generalmente suelen tener dos posiciones: abierto y cerrado. [25]



Figura 9. Electroválvula [25]

2.1.1.3. *Bomba peristáltica (0 – 80 rpm)*

Utilizada para el bombeo de un sinfín de fluidos por estar conformada por una bomba hidráulica de desplazamiento positivo; en la cual el fluido es transportado por el interior de un tubo flexible, el cual es estrangulado en el interior de la cubierta circular de la bomba por un número de rosillos o limpiadores, los cuales son accionados por un motor eléctrico el cual puede ser regulado mediante un variador de frecuencia logrando así forzar el fluido

a moverse a través del tubo por la compresión continua que se produce en el interior de la bomba entre los rodillos y la manguera. [26]



Figura 10. Bomba Peristáltica [27]

2.1.1.4. Regulador de velocidad PWM (0-24 V)

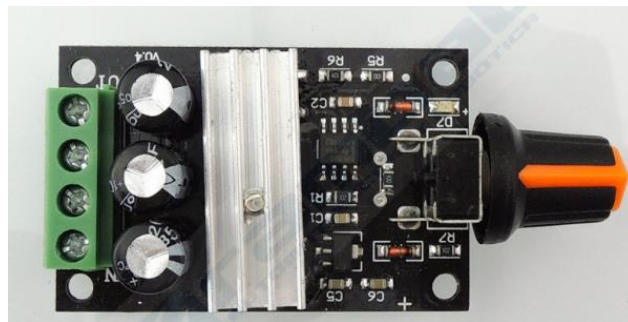


Figura 11. Regulador de velocidad [28]

Se caracteriza por poder controlar la velocidad de un motor o alguna carga de corriente continua, el cual va ajustado al potenciómetro a la velocidad que más se acomode. [28]

2.1.1.5. Convertidor de voltaje (24 – 12 V)

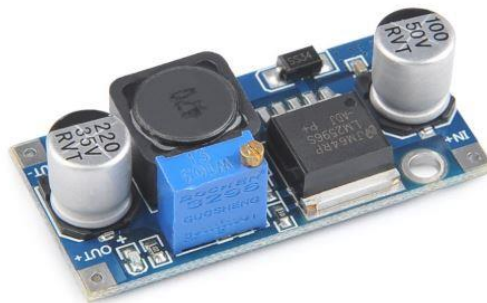


Figura 12. Convertidor de Voltaje [29]

Caracterizado por ser utilizados para instalaciones con tensiones diferentes a las que funcionan los elementos de un dispositivo, cuya función es permitir obtener una alimentación de 12 V en una instalación de 24 V sin implementar un nuevo alimentador de corriente. [30]

2.1.1.6. Bloque de mezcla (Aluminio)

Bloque hueco de aluminio que consta de dos entradas, por un lado permite el ingreso de la manguera de circulación de aceite y por otro el ingreso de aire a presión logrando en su interior el acoplamiento de los dos sistemas, obteniendo en su única salida un sistema coaxial de aire-aceite.

2.1.1.7. Manguera articulada



Figura 13. Manguera articulada [31]

Manguera flexible que puede ser alargada o recorta como se desee, su característica principal es la de ser resistente a productos químicos por lo que es empleada en las maquinas CNC ya que permiten conducir líquido refrigerante y aire. [31]

2.1.1.8. *Boquilla de pulverización*



Figura 14. Boquilla de pulverización [31]

Este tipo de boquilla de flujo concéntrico triple se caracteriza por mezclar el líquido y el aire dentro de ésta, la cual genera una atomización sumamente fina. [32]

2.1.1.9. *Línea de Aire (8 mm)*



Figura 15. Accesorios líneas de aire [33]

Línea conformados por tubería de poliuretano y accesorios utilizados para neumática estándar, su principal característica es el paso del aire que trabaja normalmente a presión entre 0 – 7 bares. [33]

2.1.1.10. Línea de aceite (4 mm)



Figura 16. Manguera línea de aceite 4mm [33]

Conformada por manguera de silicona de alta elasticidad y acoples de poliuretano su principal función es el paso del aceite o lubricante. [33]

2.1.1.11. Switch On/Off



Figura 17. Switch on/ off [34]

Considerado como un elemento intercalado en un circuito eléctrico con capacidad para interrumpir la circulación de la corriente eléctrica en el mismo y que éste en si deje de funcionar. [34]

2.1.1.12. Depósito de aceite

Recipiente plástico utilizado para el almacenaje de aceite que no está dentro del dispositivo, siendo el elemento inicial en el sistema de circulación de aceite refrigerante. [35]



Figura 18. Depósito de aceite [35]

2.1.1.13. Carcasa dispositiva MQL (Acrílico)



Figura 19. Carcasa acrílico. Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

Protección del dispositivo MQL, conformado de acrílico transparente de 5 mm, provista de ranuras para el acceso a elementos de accionamiento del dispositivo, que cuenta con un sistema de sujeción por imanes para su instalación.

2.1.1.14. Adaptador de corriente (24 V – DC)



Figura 20. Adaptador de corriente [36]

Caracterizado por proporcionar una corriente constante para cualquier dispositivo, así como la protección contra sobretensiones y sobrecalentamiento. [36]

2.2. Parámetros de funcionamiento

Para la presente experimentación el equipo de mínima cantidad de lubricación implementado funcionará en el rango de 25 a 50 ml/h y una presión de 4 bares acorde a lo descrito por Tim Walker en el manual de MQL en el cual se cita que el sistema MQL utiliza una cantidad muy pequeña de fluido para reducir la fricción de corte entre la pieza de trabajo y la herramienta. La cantidad de fluido dependerá en gran medida de los materiales, los procesos y las herramientas. Algunos materiales tienen lubricidad más natural que otros. Como regla general se utiliza de 5 a 80 ml/h en las herramientas de menos de 40 mm de diámetro. [37]

La especificación DIN alemana dispone hasta 50 ml/h de lubricante, y en casos excepcionales hasta 150 ml/h. Otros estudios han puesto la tapa a 500 ml/h, no importa el rango utilizado ya que es mucho menor que los usados con refrigerantes en el sistema de inundación que está en rangos de 30000 ml/h y 60000 ml/h. [37]

2.3. Planos

Los planos del dispositivo MQL implementado se los puede observar en el Anexo 1.

2.4. Metodología de la experimentación

2.4.1. Selección del diseño experimental para el análisis de la rugosidad superficial

Para la determinación de la influencia de un sistema de lubricación sobre la integridad superficial para el maquinado de una aleación Produx se establecieron las variables y factores que influyen directamente en el proceso de selección adecuado del diseño estadístico. En donde las variables, así como parámetros de cortes son las que afectan directamente al proceso de fresado de desbaste por planeado son: la maquina en la que se realiza el proceso, el material tanto de la herramienta como el de la probeta, el sistema de lubricación empleado los parámetros de corte como velocidad, avance y profundidad, etc. Sin embargo, en el presente trabajo de titulación se centrara en la comparación del acabado superficial obtenido por la influencia del sistema de lubricación usado en el proceso de mecanizado. [11]

Por consiguiente, se busca determinar la influencia que causa el sistema de lubricación sobre el acabado superficial, delimitando al método o sistema de lubricación como único factor de estudio en la comparación de la rugosidad Ra obtenida en el mecanizado por planeado de la aleación de Aluminio Produx. La Figura 21 explica en términos esquemáticos la formulación experimental. [11]

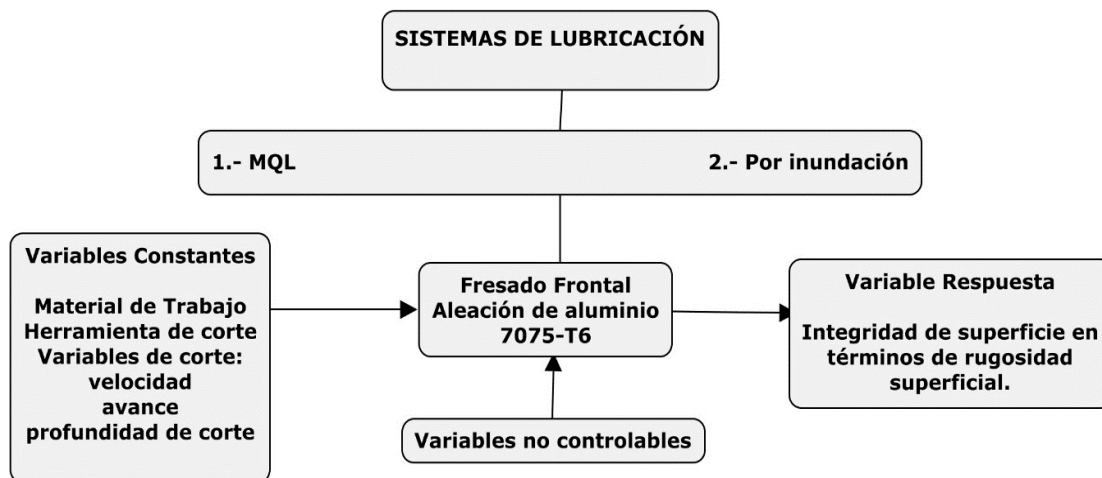


Figura 21. Esquema general del diseño experimental para evaluar la integridad de la superficie en el fresado por planeado de la aleación de Aluminio 7075-T6 [11]

2.4.2. Método Taguchi

Metodología propuesta por el Dr. Taguchi en los años sesenta, siendo está utilizada de forma amplia en estudios industriales y científicos ya que no requiere de cálculos matemáticos complejos y se la determina fácilmente los parámetros óptimos del proceso. Para la ampliación del método Taguchi se debe cumplir con tres principales parámetros tal como se muestra en la Figura 22. [11]

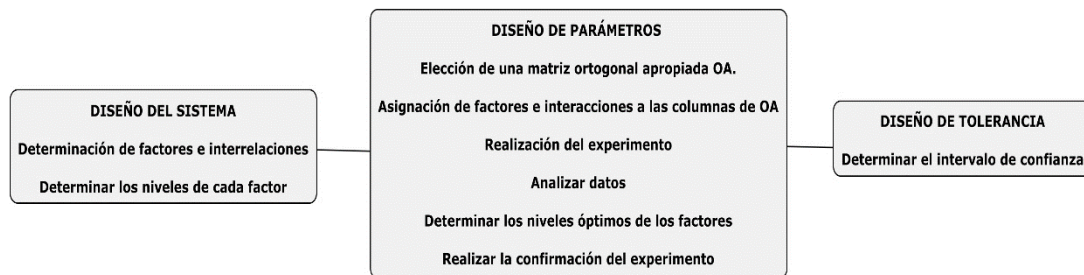


Figura 22. Tres partes principales de la aplicación de la técnica Taguchi [6]

2.4.3. Aplicación del Método Taguchi

Taguchi desarrollado varios métodos tales como matrices ortogonales y relación señal/ruido (S/N) para evaluar y optimizar productos y procesos.

El Método Taguchi es una técnica de diseño experimental que reduce el número de experimentos de manera significativa mediante el uso de un método simplificado para armar un experimento. [16]

Para la correcta aplicación de este método se determinan varios factores como son el avance, velocidad de corte, trayectoria y la profundidad radial sobre la rugosidad de la superficie. En donde el primer paso de aplicación del método es elegir el arreglo ortogonal apropiado para el estudio, considerando el tiempo/ costo para el proceso. [6]

El método de Taguchi incluye los siguientes pasos:

2.4.3.1. Selección de factores y sus niveles.

En la Tabla 12 se determinaron las condiciones de corte teniendo en cuenta las limitaciones de los instrumentos de medición, los parámetros recomendados por el fabricante de la herramienta de corte y la literatura relacionada. [16]

En la presente investigación se usarán parámetros de corte basados en la experimentación realizada por Augusto Coque, en la cual se determinó que para la rugosidad medida en sentido paralelo al mecanizado los parámetros que mejoran el acabado superficial son: velocidad de corte 450 m/min, profundidad de corte 2 mm para desbaste y 0,3 mm para acabado. [5]

Tabla 12. Determinación de factores y niveles [16]

	Factores			
	A	B	C	D
	Sistema de Lubricación	Avance por diente (mm)	Velocidad de Corte (m/min)	Profundidad de corte (mm)
Nivel 1	MQL (50 ml/h)	0,1	450	2
Nivel 2	MQL (25 ml/h)	0,2	450	2
Nivel 3	Por Inundación	0,3	450	2

Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

2.4.3.2. Elección de la matriz ortogonal

Identificados los parámetros de corte que se emplearan en la investigación se precisará la matriz ortogonal adecuada en función de los niveles y factores que en este caso son 3 y 4 respectivamente. [16]

En este caso la matriz ortogonal L9 es la combinación idónea para la investigación la cual tiene cuatro columnas de tres niveles como se muestra en la Tabla 12. [16]

Tabla 13. Matriz ortogonal L9 [16]

Exp. No.	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

La matriz ortogonal de tres niveles es la combinación más pequeña aplicable en el Método Taguchi; en este estudio, el arreglo ortogonal L9 es apropiado para el diseño. Los factores variables se colocan en las primeras dos columnas, dejando la tercera y cuarta columna para los valores constantes. Este diseño reduce a 9 evaluaciones experimentales. El diseño experimental se muestra en la Tabla 13. [16]

Tabla 14. Diseño experimental según la matriz ortogonal L9 [16]

	A	B	C	D
	Sistema de Lubricación	Avance por diente (mm)	Velocidad de Corte (m/min)	Profundidad de corte (mm)
1	MQL (50 ml/h)	0.1	450	2
2	MQL (50 ml/h)	0.2	450	2
3	MQL (50 ml/h)	0.3	450	2
4	MQL (25 ml/h)	0.1	450	2
5	MQL (25 ml/h)	0.2	450	2
6	MQL (25 ml/h)	0.3	450	2
7	Por Inundación	0.1	450	2
8	Por Inundación	0.2	450	2
9	Por Inundación	0.3	450	2

Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

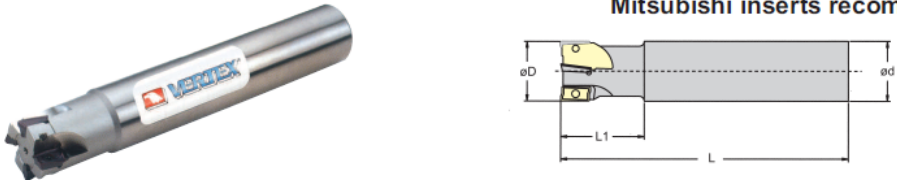
2.5. Parámetros de maquinado

2.5.1. Herramienta

Para la presente investigación como se observa en la Figura 23, se empleó la fresa de diámetro 16 mm (Vertex –VAPX - 1616), para alto avance sin sistema de refrigeración interna con 2 filos cortantes, con insertos de carburo (Mitsubishi - AOMT 123608). [38]

High-Speed Rough End Mills

Mitsubishi inserts recommended



ORDER NO.	D	d	L	L1	TEETH	INSERT	SCREW	WRENCH	CODE NO.
VAPX-1616	16	16	120	24	2				6002-030
VAPX-1716	17	16	150	24	2				6002-031
VAPX-2020	20	20	150	29	3				6002-032
VAPX-2120	21	20	150	29	3	AOMT 123608	SCR- APX2.5	T8	6002-033
VAPX-2525	25	25	150	34	4				6002-034
VAPX-2625	26	25	200	34	4				6002-035

Figura 23. Herramienta seleccionada [38]

2.5.2. Cálculo de parámetros de corte

Aplicando la ecuación (1) determinaremos el número de revoluciones (N) en rpm

Tabla 15. Cálculo número de revoluciones

DATOS	
V_c	\varnothing fresa
450 (m/min)	16

Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

$$V_c = \frac{\pi \times N \times D}{1000}$$

$$N = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D}$$

$$N = \frac{450 \times 1000}{\pi \times 16} = 8952 \text{ rpm}$$

Mediante el cálculo del número de revoluciones determinamos la velocidad de avance por diente (Vf_z), aplicando la ecuación (2).

Tabla 16. Cálculo velocidad de avance por diente.

f_{z1}	N (rpm)
0,1	8952
0,2	8952
0,3	8952

Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

$$vf = f_z \times z \times N \quad (2)$$

$$Vf_1 = 0,1 \text{ mm/diente} \times 2 \times 8952 \text{ rpm}$$

$$Vf_1 = 1790 \text{ mm/min}$$

$$Vf_2 = 0,2 \text{ mm/diente} \times 2 \times 8952 \text{ rpm}$$

$$Vf_2 = 3580 \text{ mm/min}$$

$$Vf_3 = 0,3 \text{ mm/diente} \times 2 \times 8952 \text{ rpm}$$

$$Vf_3 = 5370 \text{ mm/min}$$

2.6. Plan de desarrollo de la experimentación

En este punto se detalla mediante un diagrama de flujo los pasos que se deben seguir para el desarrollo de la investigación.

En la Figura 24 y 25 se muestra el diagrama para el desarrollo de la investigación comparativa entre un sistema de lubricación por mínima cantidad (MQL) con fluido de corte Multi - WFC y un sistema de lubricación por inundación con aceite soluble D, en el acabado superficial del fresado del aluminio 7075-T6.

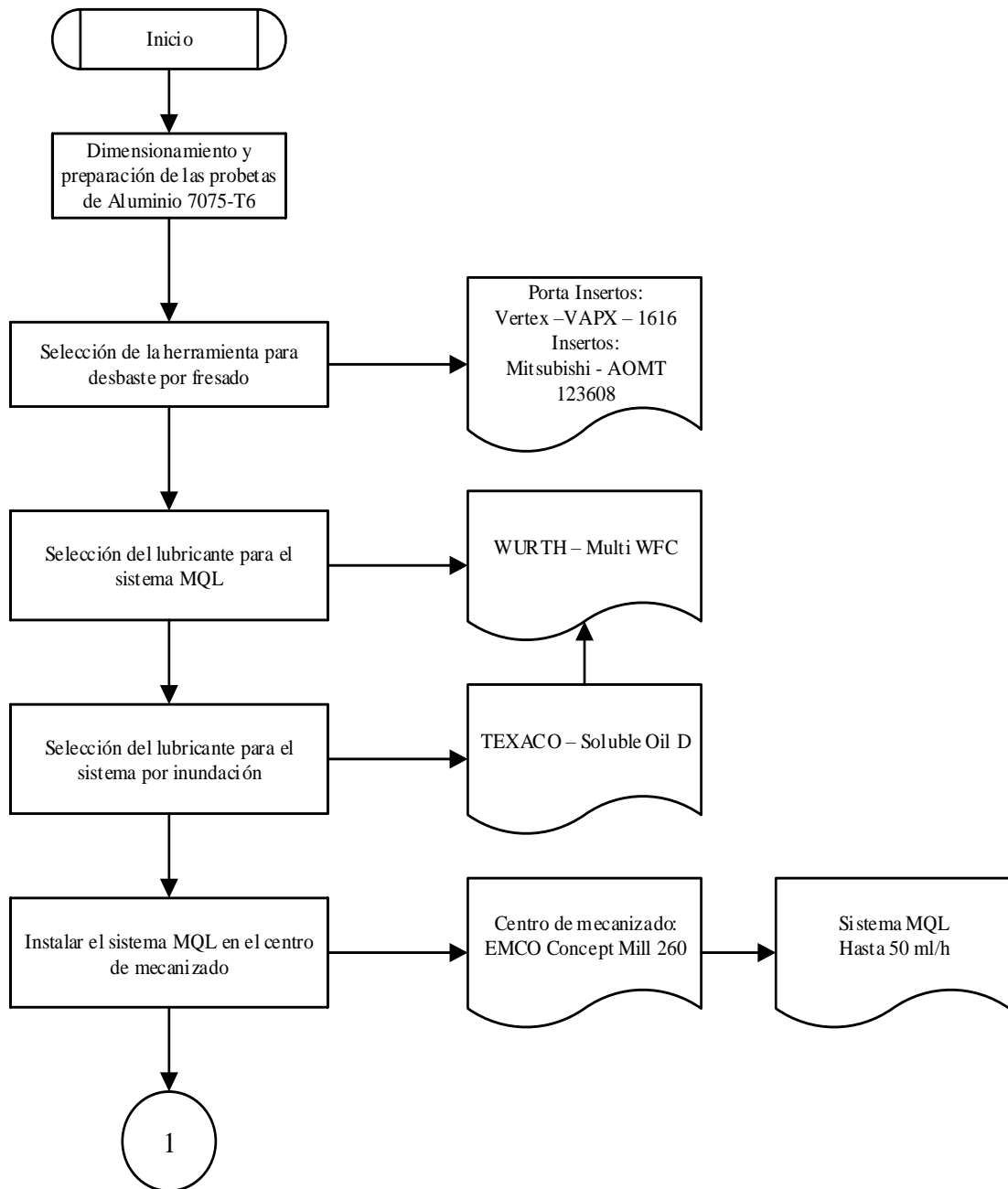


Figura 24. Diagrama para el desarrollo de la investigación comparativa

Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

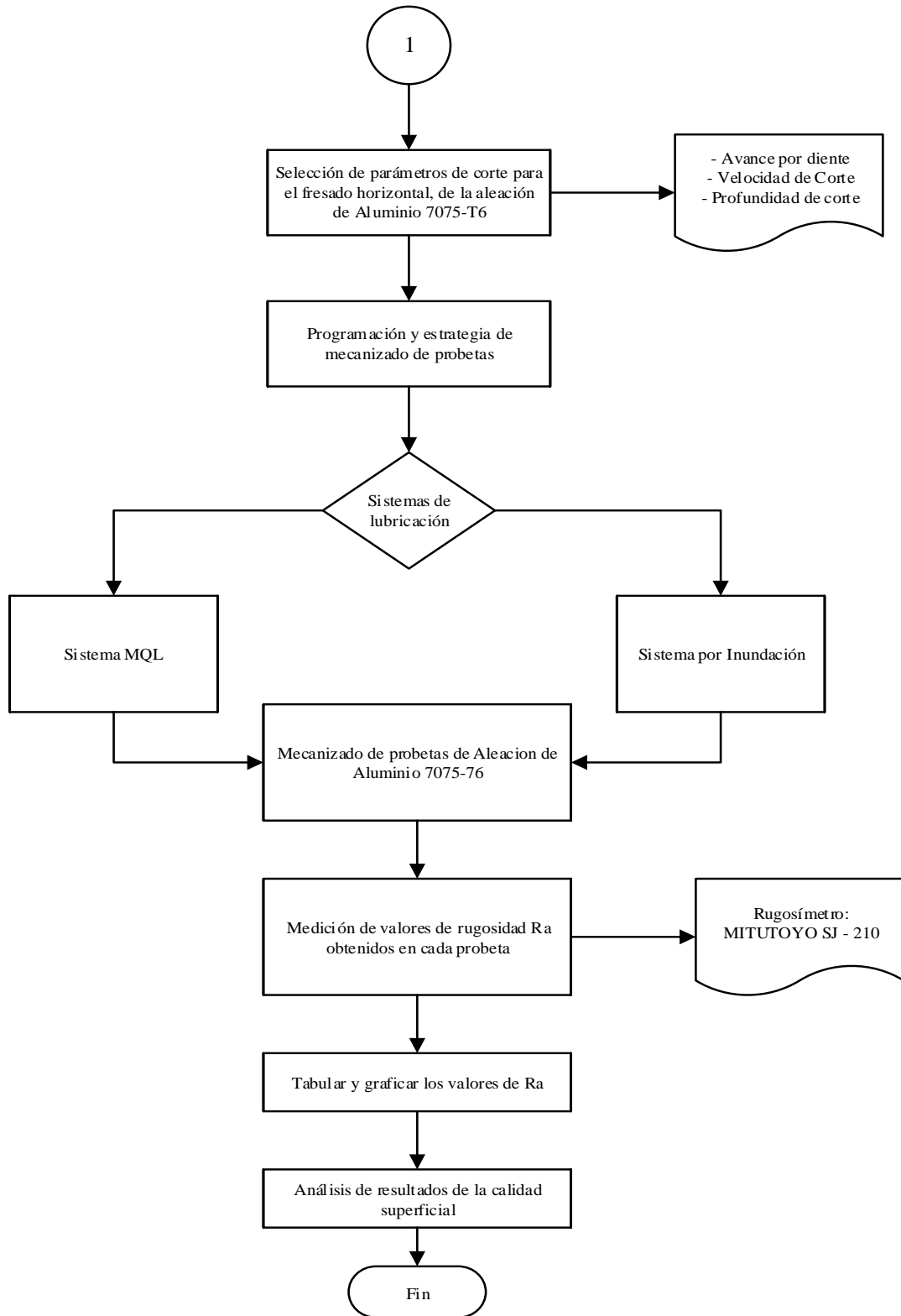


Figura 25. Diagrama para el desarrollo de la investigación comparativa

Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

2.7. Desarrollo

En el presente apartado se describe los procesos que se llevaron a cabo en la investigación para la recolección de los resultados de la experimentación.

2.7.1. Dimensionamiento y preparación de las probetas de Aluminio 7075 T6

En la investigación se elaboraron probetas de Aluminio 7075 T6, de 40 mm de diámetro por 25 mm de largo, las mismas que se obtienen de un eje sólido y son dimensionadas con la ayuda de un torno CNC.

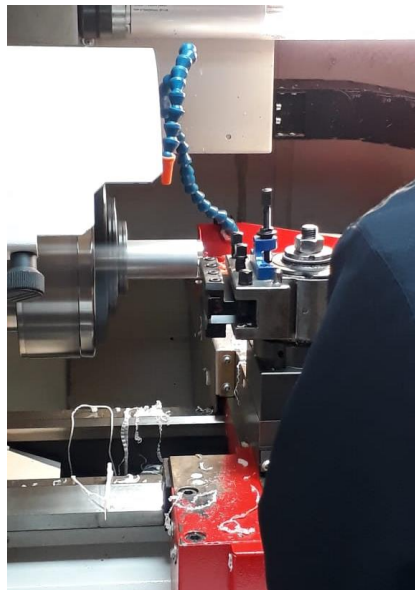


Figura 26. Elaboración de probetas. Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

2.7.2. Selección de la herramienta para desbaste por fresado de planeado.

Para la presente investigación seleccionar la fresa porta insertos VAPX – 1616, de 16 mm de diámetro marca Vertex, con sus respectivos insertos de carburo AOMT 123608, de marca Mitsubishi.

2.7.3. Selección del lubricante

Utilizar dos sistemas de lubricación para comparar su influencia en el fresado de la aleación de Aluminio Produx; el primero es el sistema tradicional por inundación para este proceso se utilizar un aceite soluble en agua con un caudal de 65 l/min a 3,5 bares, por

recomendación de EMCO fabricante del centro de mecanizado empleado para la investigación; en el caso de los sistemas MQL el lubricante utilizado tiene propiedades químicas y físicas aplicadas para poder alcanzar un funcionamiento satisfactorio. [36]

Los lubricantes diseñados para funcionar con MQL son biodegradables, ya que se encuentran formulados en base a aceites vegetales, caracterizados debido a que su gran mayoría son elaborados de aceite minerales. Por lo que se caracterizan por ser lubricantes con una elevada resistencia a la oxidación, con alta viscosidad puesto que deben soportar elevadas temperaturas por estar adheridos a la herramienta como a la pieza de trabajo. [36]

2.7.3.1. Lubricante para el sistema MQL

Utilizar el fluido de corte Multi-WFC el cual es un aceite sintético, biodegradable que no necesita ser diluido y entre sus principales características ofrece una máxima lubricación, mínima fricción herramienta-pieza, reducción del desgaste de la herramienta además de ser un producto libre de solventes volátiles que sustituye aceites minerales; el cual puede ser utilizado en acero, hierro, acero inoxidable, aluminio, bronce, latón, cobre y estaño tanto en trabajo de roscado, taladrado, torneado, fresado, acerrado y perforado .



Figura 27. Fluido de corte [40]

Tabla 17. Datos Técnicos de Corte [40]

Datos Técnicos	
Nombre	Multi-WFC
Marca	Wurth
Aspecto	Líquido
Color	Amarillo claro
Densidad	0,90 g/cm ³
Viscosidad a 40°C	4 cSt
Punto de ignición	>65° C
Solubilidad	Insoluble en agua

2.7.3.2. Lubricante para el sistema por inundación

En la investigación usar un aceite soluble con una proporción agua/aceite de 10:1 de marca Texaco Soluble Oil D.

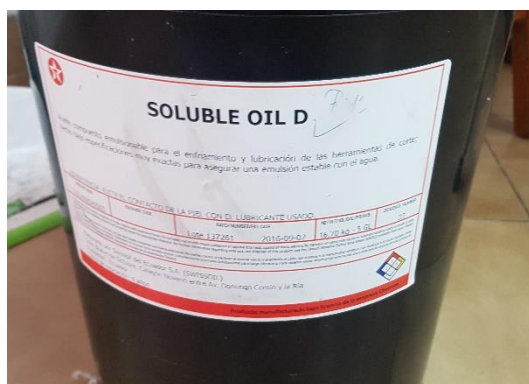


Figura 28. Lubricante para el sistema por inundación [41]

Tabla 18. Datos Técnicos Lubricante [41]

Datos Técnicos	
Nombre	Soluble Oil D
Marca	Texaco
Color de concentrado	Café claro
Color ya diluido	Blanco
Gravedad API	20,4
Viscosidad a 40° C	38 cSt
Punto de inflamación	160° C
Solubilidad	Soluble en agua

2.7.4. Instalación del sistema MQL en el centro de mecanizado CNC.

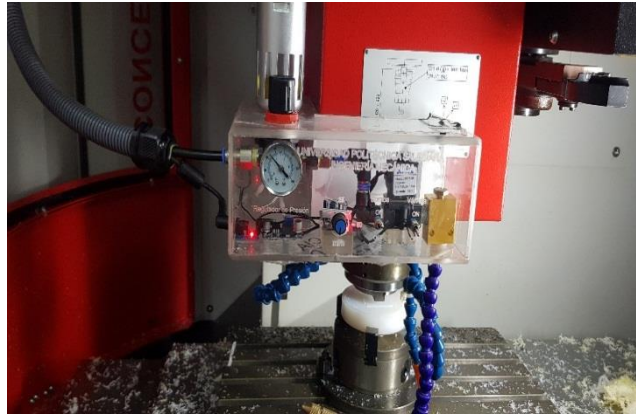


Figura 29. Instalación del equipo MQL. Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

Anclar el equipo MQL, al centro de mecanizado vertical marca EMCO Concept Mill 260, por medio de un sistema de magnetización, generado por imanes permanentes colocados en la carcasa del dispositivo MQL.

2.7.5. Selección de los parámetros de corte.

La selección de los parámetros de corte están dados con referencia en la matriz ortogonal generada para el diseño experimental de cada probeta.

Tabla 19. Selección Parámetros de corte desbaste

Nº Probeta	Sistema de Lubricación	Avance por diente (mm)	Velocidad de Corte (m/min)	Profundidad de corte (mm)	Velocidad de avance por diente (mm/min)
1	MQL (50 ml/h)	0.1	450	2	1790
2	MQL (50 ml/h)	0.2	450	2	3580
3	MQL (50 ml/h)	0.3	450	2	5370
4	MQL (25 ml/h)	0.1	450	2	1790
5	MQL (25 ml/h)	0.2	450	2	3580

6	MQL (25 ml/h)	0.3	450	2	5370
7	Por Inundación	0.1	450	2	1790
8	Por Inundación	0.2	450	2	3580
9	Por Inundación	0.3	450	2	5370

Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

Tabla 20. Selección Parámetros de corte acabado

N° Probeta	Sistema de Lubricación	Avance por diente (mm)	Velocidad de Corte (m/min)	Profundidad de corte (mm)	Velocidad de avance por diente (mm/min)
1	MQL (50 ml/h)	0.1	450	0,2	1790
2	MQL (50 ml/h)	0.2	450	0,2	3580
3	MQL (50 ml/h)	0.3	450	0,2	5370
4	MQL (25 ml/h)	0.1	450	0,2	1790
5	MQL (25 ml/h)	0.2	450	0,2	3580
6	MQL (25 ml/h)	0.3	450	0,2	5370
7	Por Inundación	0.1	450	0,2	1790
8	Por Inundación	0.2	450	0,2	3580
9	Por Inundación	0.3	450	0,2	5370

Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

2.7.6. Programación del centro de mecanizado

La programación para el mecanizado de las probetas se debe realizar en el software EMCO WinNC for Sinumerik Operate, que es parte del centro de mecanizado Concept Mill 260.

2.7.7. Estrategia de mecanizado

En la elaboración de las probetas utilizar una trayectoria de mecanizado de X a Y con retracción, misma programación que constará de cinco pasadas que habrán de solaparse 6 mm entre ellas.

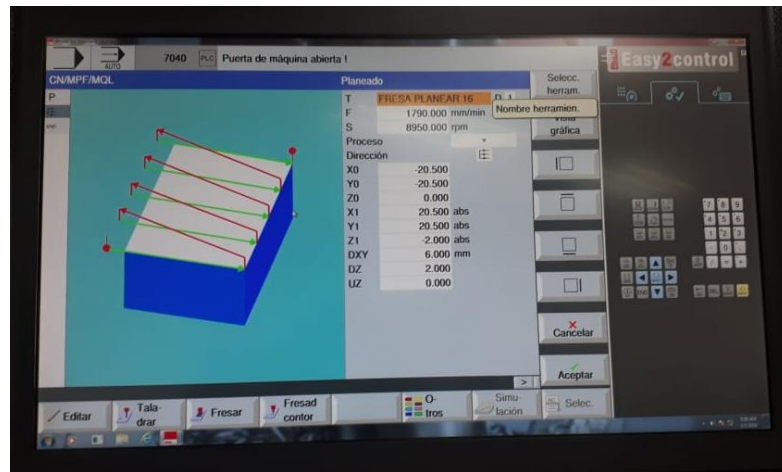


Figura 30. Trayectoria de Mecanizado de X a Y. Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

El sistema de lubricación será seleccionado de forma manual en base a la matriz del diseño experimental.

2.7.8. Medición de valores de rugosidad Ra

La medición de valores de rugosidad superficial Ra son obtenidos mediante el equipo Mitutoyo SJ 210, del cual sus características están descritas en la Tabla 21.



Figura 31. Dispositivo medidor de rugosidad [42]

Tabla 21. Especificaciones del Rugosímetro [42]

Mitutoyo SJ 210	
Pantalla	Digital
Rango de medición en X	17,5 mm
Rango de medición en Z	360 μm (-200 μm - +160 μm)
Velocidad de seguimiento en medición	(0,25 - 0,5 - 0,75) mm/s
Radio de la punta aguda	5 μm
Rango mínimo / resolución	(25 μm / 0,002 μm)

2.7.9. Procedimiento para la toma de valores de rugosidad Ra

Para el inicio de toma de valores de rugosidad proceder a verificar el equipo con el patrón de rugosidad Ra (2.97 μm) tal como se indica en la Figura 32.



Figura 32. Medición de Rugosidad. Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

Realizar la medición de la rugosidad en la superficie de las probetas, en cinco puntos diferentes por cada probeta, en sentido paralelo al mecanizado, dando como resultado un total de 45 muestras tomadas, ya que se realizaron 9 probetas con 5 muestras por cada una.

2.7.10. Valores de rugosidad obtenidos para Desbaste Profundidad 2mm

En la Figura 33 se observa la toma de medidas de rugosidad para el proceso de desbaste.



Figura 33. Toma de medidas de rugosidad para desbaste (Probetas). Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

En la Tabla 22 se resume los datos medidos de rugosidad Ra, en la experimentación para el proceso de fresado por planeado para desbaste con profundidad por pasada de 2 mm, las medidas fueron obtenidas mediante el Rugosímetro Mitutoyo SJ 21.

Tabla 22. Tabla valores de rugosidad para el proceso de desbaste con profundidad de 2mm

	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
Número de mediciones	50ml/h 0,1	50ml/h 0,2	50ml/h 0,3
de	$V_{f1} = 1790$ mm/min	$V_{f2} = 3580$ mm/min	$V_{f3} = 5370$ mm/min
Rugosidad	Profundidad = 2mm	Profundidad = 2mm	Profundidad = 2mm
	Rugosidad (μm)	Rugosidad (μm)	Rugosidad (μm)
Ra ₁	1,141	3,445	5,359
Ra ₂	1,093	3,945	5,378
Ra ₃	1,296	3,405	5,434
Ra ₄	1,118	3,809	5,339
Ra ₅	1,071	3,981	5,469
	PROBETA 4	PROBETA 5	PROBETA 6
Número de mediciones	25ml/h 0,1	25ml/h 0,2	25ml/h 0,3
de	$V_{f1} = 1790$ mm/min	$V_{f2} = 3580$ mm/min	$V_{f3} = 5370$ mm/min
Rugosidad	Profundidad = 2mm	Profundidad = 2mm	Profundidad = 2mm
	Rugosidad (μm)	Rugosidad (μm)	Rugosidad (μm)
Ra ₁	1,446	3,209	4,749
Ra ₂	1,119	3,035	4,734
Ra ₃	1,198	3,487	5,549
Ra ₄	1,201	3,643	5,883
Ra ₅	1,137	3,542	5,002

	PROBETA 7	PROBETA 8	PROBETA 9
Número de mediciones de Rugosidad	Inundación 0,1 $V_{f1} = 1790$ mm/min Profundidad = 2mm Rugosidad (μm)	Inundación 0,2 $V_{f2} = 3580$ mm/min Profundidad = 2mm Rugosidad (μm)	Inundación 0,3 $V_{f3} = 5370$ mm/min Profundidad = 2mm Rugosidad (μm)
Ra_1	1,603	2,055	2,273
Ra_2	1,167	2,073	2,069
Ra_3	1,160	2,180	2,025
Ra_4	1,430	2,021	2,026
Ra_5	1,483	2,412	2,429

Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

2.7.11. Valores de rugosidad obtenidos para Acabado Profundidad 0,3 mm.

En la Figura 34 se muestra la toma de medidas de rugosidad para el proceso de acabado.



Figura 34. Toma de medidas de rugosidad para acabado (Probetas). Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

La Tabla 23 resume los datos medidos de rugosidad Ra , en la experimentación para el proceso de fresado por planeado para acabado con profundidad por pasada de 0,3 mm, las medidas fueron obtenidas mediante el Rugosímetro Mitutoyo SJ 210.

Tabla 23. Tabla valores de rugosidad para el proceso de acabado con una profundidad de 0,3 mm

Número de mediciones de Rugosidad	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
	50ml/h 0,1 $V_{f1} = 1790$ mm/min Profundidad = 0,3mm Rugosidad (μm)	50ml/h 0,2 $V_{f2} = 3580$ mm/min Profundidad = 0,3mm Rugosidad (μm)	50ml/h 0,3 $V_{f3} = 5370$ mm/min Profundidad = 0,3mm Rugosidad (μm)
Ra ₁	0,465	1,024	1,678
Ra ₂	0,461	1,239	1,640
Ra ₃	0,581	1,146	1,644
Ra ₄	0,632	1,337	1,433
Ra ₅	0,456	1,192	1,684

Número de mediciones de Rugosidad	PROBETA 4	PROBETA 5	PROBETA 6
	25ml/h 0,1 $V_{f1} = 1790$ mm/min Profundidad = 0,3mm Rugosidad (μm)	25ml/h 0,2 $V_{f2} = 3580$ mm/min Profundidad = 0,3mm Rugosidad (μm)	25ml/h 0,3 $V_{f3} = 5370$ mm/min Profundidad = 0,3mm Rugosidad (μm)
Ra ₁	0,574	1,046	2,158
Ra ₂	0,578	1,156	2,01
Ra ₃	0,597	1,540	1,859
Ra ₄	0,561	1,151	1,964
Ra ₅	0,562	1,237	2,396

	PROBETA 7	PROBETA 8	PROBETA 9
Número de mediciones de Rugosidad	Inundación 0,1 $V_{f1} = 1790$ mm/min Profundidad = 0,3mm Rugosidad (μm)	Inundación 0,2 $V_{f2} = 3580$ mm/min Profundidad = 0,3mm Rugosidad (μm)	Inundación 0,3 $V_{f3} = 5370$ mm/min Profundidad = 0,3mm Rugosidad (μm)
Ra ₁	0,567	1,934	2,193
Ra ₂	0,542	1,687	2,187
Ra ₃	0,547	1,846	2,397
Ra ₄	0,562	1,559	2,454
Ra ₅	0,565	1,634	2,616

Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA CALIDAD SUPERFICIAL Y ANÁLISIS ECONÓMICO

3.1. Análisis de resultados

En la Figura 35 se muestra los resultados obtenidos del mecanizado de probetas para el análisis comparativo del acabado superficial en aleación de aluminio 7075-T6 para un proceso de mecanizado CNC entre un sistema de lubricación de mínima cantidad y un sistema de lubricación por inundación.



Figura 35. Acabado superficial de probetas mecanizadas con diferentes sistemas de lubricación.

Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

3.2. Resultados obtenidos en el acabado superficial por desbaste entre un sistema MQL y un sistema por inundación

En la Tabla 22 se indican los valores de rugosidad Ra para desbaste, medidos en cinco puntos diferentes para cada una de las probetas, en función del sistema de lubricación y los parámetros de corte establecidos en el diseño experimental, además se calculó el valor promedio, para poder determinar la menor rugosidad entre las pruebas como se lo observa en la Tabla 24.

Tabla 24. Datos obtenidos en la experimentación (Desbaste)

No Probeta	Sistema de lubricación	f_z	V_c [m/min]	z	V_f [mm/min]	Ra_1 [μm]	Ra_2 [μm]	Ra_3 [μm]	Ra_4 [μm]	Ra_5 [μm]	Ra [μm] Promedio
1	50 ml/h	0,1	450	2	1790	1,141	1,093	1,296	1,118	1,071	1,144
2	50 ml/h	0,2	450	2	3580	3,445	3,945	3,405	3,809	3,981	3,717
3	50 ml/h	0,3	450	2	5370	5,359	5,378	5,434	5,339	5,469	5,396
4	25 ml/h	0,1	450	2	1790	1,446	1,119	1,198	1,201	1,137	1,220
5	25 ml/h	0,2	450	2	3580	3,209	3,035	3,487	3,643	3,542	3,383
6	25 ml/h	0,3	450	2	5370	4,749	4,734	5,549	5,883	5,002	5,183
7	Inundación	0,1	450	2	1790	1,603	1,167	1,16	1,43	1,483	1,369
8	Inundación	0,2	450	2	3580	2,055	2,073	2,18	2,021	2,412	2,148
9	Inundación	0,3	450	2	5370	2,273	2,069	2,025	2,026	2,429	2,164

Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

El valor de menor rugosidad medido en el desbaste fue de 1.144 μm el cual se obtuvo con el sistema MQL con caudal de 50 ml/h de lubricante, 8952 rpm, avance por diente de 1790 mm/min, velocidad de corte de 450 m/min y una profundidad por pasada de 2 mm con una trayectoria de X a Y con retracción.

En la Figura 36 se muestra la gráfica de resultados rugosidad Ra vs Velocidad de avance por diente Vf, para desbaste con el sistema MQL a 50 ml/h.



Figura 36. Acabado superficial en desbaste con MQL a 50 ml/h.

Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

En la Figura 37 se muestra la gráfica de resultados rugosidad Ra vs Velocidad de avance por diente Vf, para desbaste con el sistema MQL a 25 ml/h.

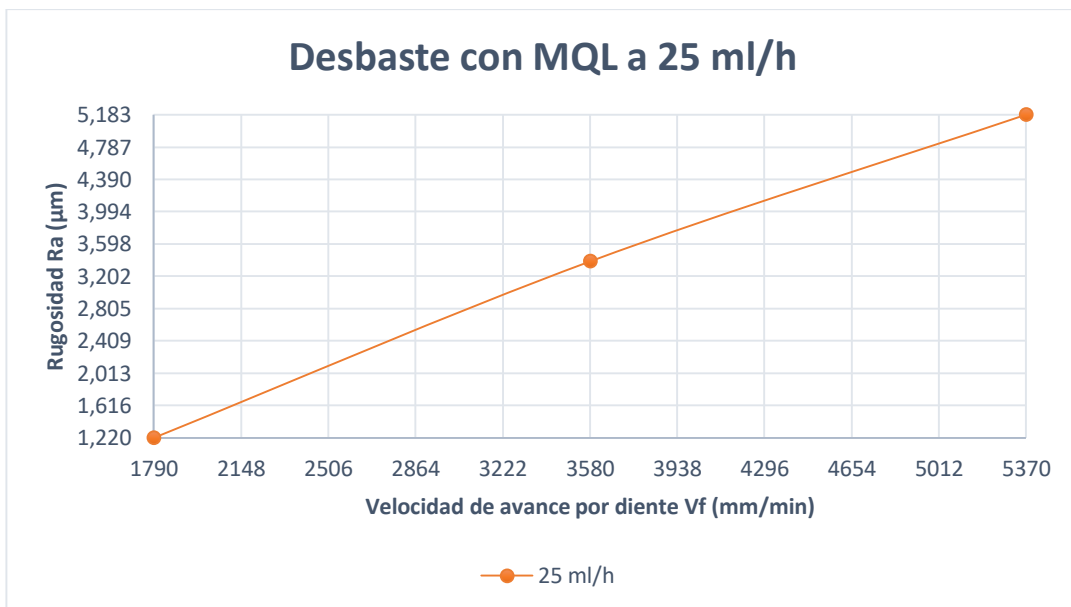


Figura 37. Acabado superficial en desbaste con Mql a 25 ml/h.

Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

En la Figura 38 se muestra la gráfica de resultados rugosidad Ra vs Velocidad de avance por diente Vf, para desbaste con sistema de inundación con taladrina.



Figura 38. Acabado superficial en desbaste con sistema por inundación.

Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

La Figura 39 muestra la gráfica de resultados comparativos de rugosidad Ra vs Velocidad de avance por diente Vf, en desbaste para cada sistema de lubricación con el cual se realizó la experimentación.

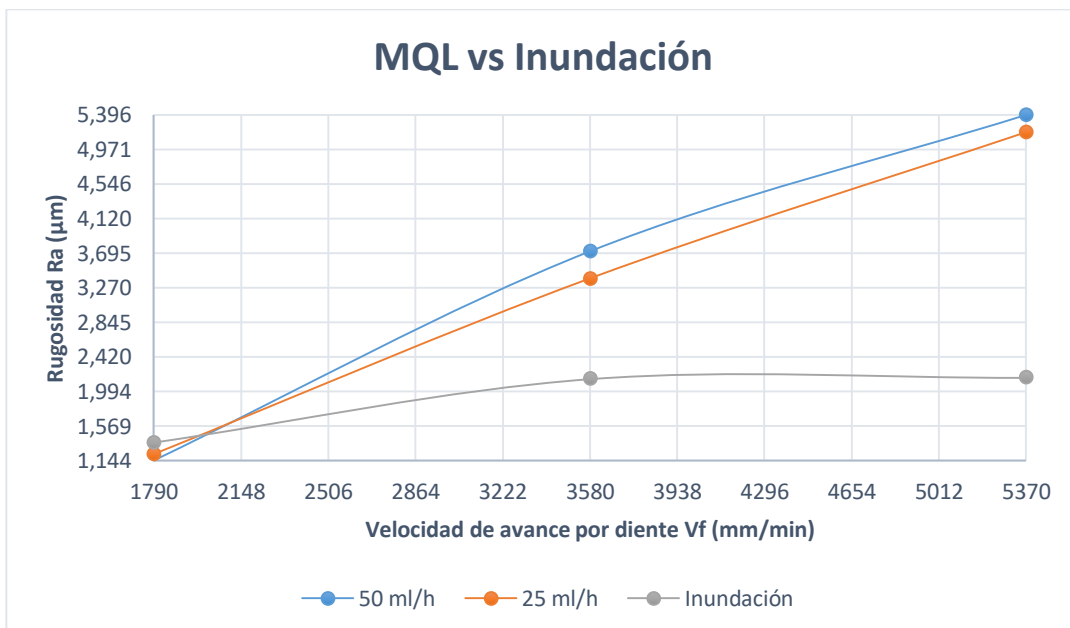


Figura 39. Comparativo del acabado superficial por desbaste de probetas mecanizadas con diferentes sistemas de lubricación. Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

Mediante la experimentación se puede analizar que los valores de rugosidad obtenidos para un proceso de desbaste por fresado con profundidad de 2 mm se ven directamente afectados por la influencia del sistema de lubricación y se puede determinar que la utilización de un sistema MQL no es la mejor opción en este caso ya que los valores medidos dan como resultado una mejor rugosidad Ra con un sistema de lubricación por inundación.

3.3. Resultados obtenidos en el acabado superficial entre un sistema MQL y un sistema por inundación

Tabla 25. Datos obtenidos en la experimentación (Acabado)

No Probeta	Sistema de lubricación	fz	V _c [m/min]	z	V _f [mm/min]	Ra ₁ [μm]	Ra ₂ [μm]	Ra ₃ [μm]	Ra ₄ [μm]	Ra ₅ [μm]	Ra [μm] Promedio
1	50 ml/h	0,1	450	0,3	1790	0,465	0,461	0,518	0,632	0,456	0,506
2	50 ml/h	0,2	450	0,3	3580	1,024	1,239	1,146	1,337	1,192	1,188
3	50 ml/h	0,3	450	0,3	5370	1,678	1,64	1,664	1,433	1,168	1,513
4	25 ml/h	0,1	450	0,3	1790	0,574	0,578	0,597	0,561	0,562	0,574
5	25 ml/h	0,2	450	0,3	3580	1,046	1,156	1,540	1,151	1,237	1,226
6	25 ml/h	0,3	450	0,3	5370	2,158	2,01	1,859	1,964	2,396	2,077
7	Inundación	0,1	450	0,3	1790	0,567	0,542	0,547	0,562	0,565	0,557
8	Inundación	0,2	450	0,3	3580	1,934	1,687	1,846	1,559	1,634	1,732
9	Inundación	0,3	450	0,3	5370	2,193	2,187	2,397	2,454	2,616	2,369

Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

En la Tabla 23 se indican los valores de rugosidad Ra para acabado, medidos en cinco puntos diferentes para cada una de las probetas, en función del sistema de lubricación y los parámetros de corte establecidos en el diseño experimental, además se calculó el valor

promedio, para poder determinar la menor rugosidad entre las pruebas como se lo observa en la Tabla 25.

El valor de menor rugosidad medido en el acabado fue de 0,506 μm el cual se obtuvo con el sistema MQL con una cantidad de fluido de 50 ml/h, 8952 rpm, avance por diente de 1790 mm/min, velocidad de corte de 450 m/min y una profundidad por pasada de 0,3 mm con una trayectoria de X a Y con retracción.

En la Figura 40 se muestra la gráfica de resultados rugosidad Ra vs velocidad de avance por diente Vf, para acabado con el sistema MQL a 50 ml/h.

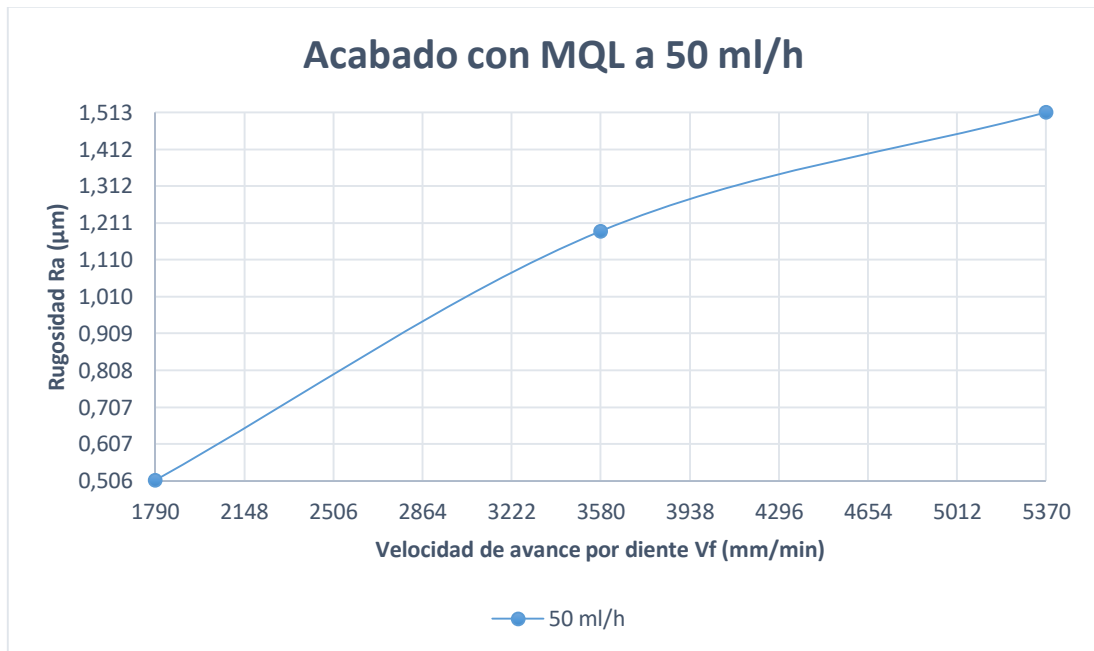


Figura 40. Acabado superficial con Mql a 50 ml/h. Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

En la Figura 41 se muestra la gráfica de resultados rugosidad Ra vs Velocidad de avance por diente Vf, para acabado con el sistema MQL a 25 ml/h.

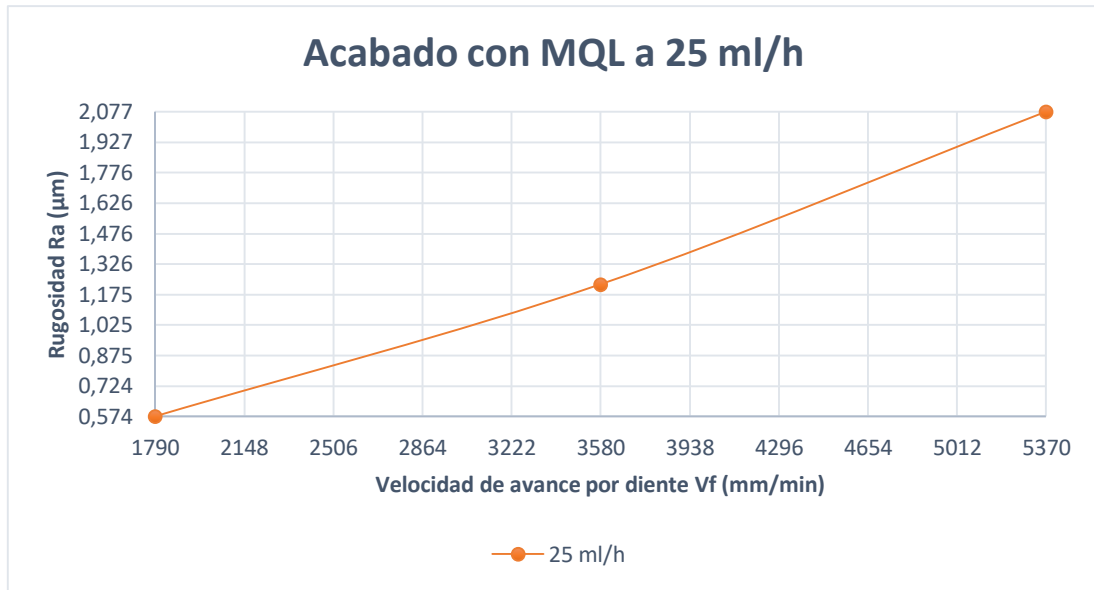


Figura 41. Acabado superficial en desbaste con Mql a 25 ml/h.

Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

En la Figura 42 se muestra la gráfica de resultados de rugosidad R_a vs Velocidad de avance por diente V_f para un acabado con sistema de inundación con taladrina.



Figura 42. Acabado Superficial con un sistema por inundación.

Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

En la Figura 43 se muestra la gráfica de resultados comparativos de rugosidad Ra vs Velocidad de avance por diente V_f en acabado para cada sistema de lubricación con el cual se realizó la experimentación.

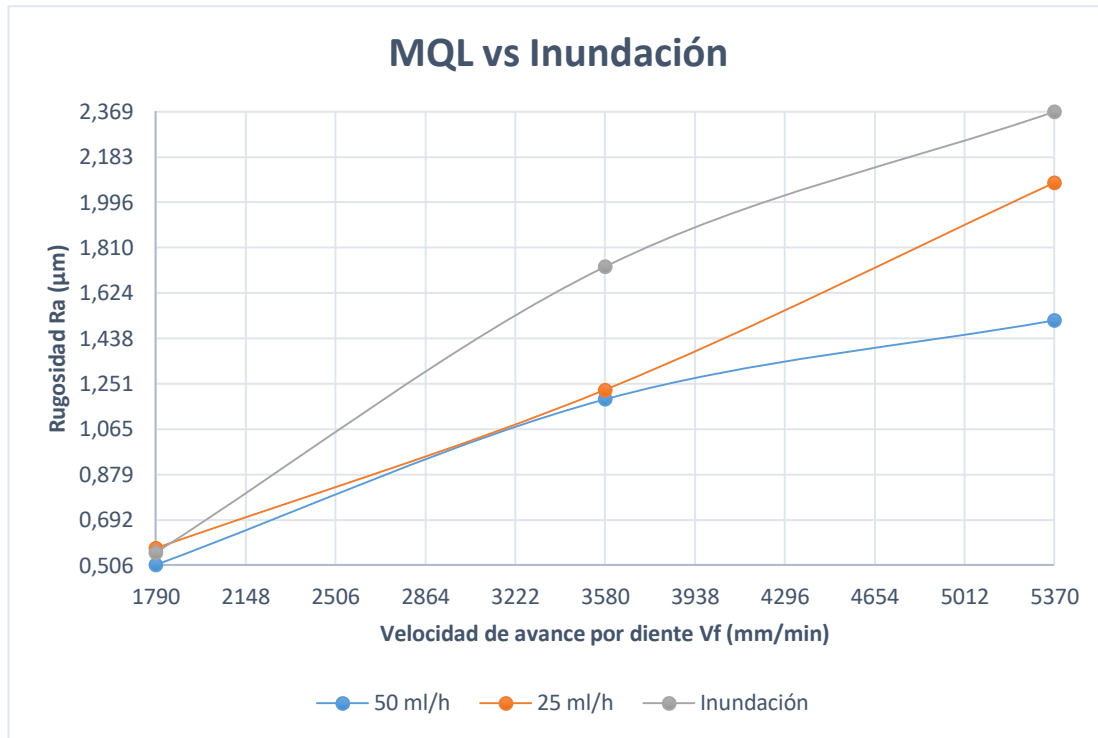


Figura 43. Análisis comparativo del acabado superficial de probetas mecanizadas con diferentes sistemas de lubricación. Elaborador por: Sebastián Nicolalde y Mario Tutillo

Al analizar los resultados medidos de la rugosidad superficial para el acabado, en un proceso de fresado con profundidad de 0,3 mm; se pudo determinar que el sistema de mínima cantidad de lubricación es la mejor opción ya que nos brinda un mejor acabado superficial en comparación con un sistema por inundación y nos permite obtener virutas relativamente libres de lubricante disminuyendo así el impacto ambiental generado en mecanizado a causa del uso de fluidos de corte.

3.4. Análisis económico

En la presente sección se detalla los gastos en los que se incurrieron para el desarrollo del proyecto de titulación.

3.4.1. Costos directos

En la Tabla 26 se enlista el análisis de costo de involucrados en el proyecto de titulación.

Tabla 26. Análisis económico costos directos

N°	Descripción	Unidades	Valor Unitario (USD)	Valor Total (USD)
	DISPOSITIVO MQL	1	60	60
1	Bomba Peristáltica	1	60	60
2	Electroválvula	1	45	45
3	Regulador de presión	1	30	30
4	Bloque de mezcla (Aluminio)	1	10	10
5	Manguera articulada	1	30	30
6	Boquilla de pulverización	1	20	20
7	Manguera y accesorios línea de Aire	1	20	20
8	Manguera y accesorios línea de aceite	1	15	15
9	Elementos eléctricos	1	40	40
10	Depósito de aceite	1	15	15
11	Carcasa dispositivo MQL (Acrílico)	1	50	50
12	Variador de velocidad	1	30	30
13	Adaptador de corriente (24 V – DC)	1	25	25
	MECANIZADO			
14	Fresa porta insertos	1	120	120
15	Insertos de carburo	4	15	60
16	Aluminio 7075 T6	1	120	120
17	Fluido de corte	1	20	20
18	Varios	1	100	100
			TOTAL	870

Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

3.4.2. Costos indirectos

En la Tabla 27 se detalla los costos involucrados indirectamente en el proyecto.

Tabla 27. Análisis económico costos indirectos

Descripción	Valor (USD)
Transporte	100
Materiales de oficina	60
Tecnología	40
Total	200

Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

3.4.3. Costo total

La Tabla 28 muestra el balance final de los gastos que se realizaron en la elaboración del proyecto de titulación.

Tabla 28. Balance Final

Descripción	Valor (USD)
Costos directos	870
Costos indirectos	200
Costo Total	1070

Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

El costo final del proyecto se puede ver significativamente favorecido gracias a la utilización del Método Taguchi ya que este nos permite reducir el número de ensayos experimentales, por consiguiente, el tiempo de mecanizado es menor dando como resultado un costo menor en la elaboración del proyecto.

CONCLUSIONES

- Se diseñó un dispositivo de mínima cantidad de lubricación externo de doble conducto en el cual el aire a presión y el lubricante son conducidos por separado a la boquilla coaxial de flujo concéntrico triple evitando la formación de gotas de lubricante; las condiciones de trabajo del dispositivo utilizadas para el proyecto técnico de titulación son presión de aire de 4 bares y tasa de flujo de lubricante de 25 y 50 ml/h.
- En base a los resultados obtenidos se determinó que la cantidad mínima de lubricante es de 25 ml/h en la aplicación del sistema MQL, para obtener mejoras en los valores de rugosidad superficial Ra, en comparación con el sistema de lubricación por inundación en el proceso de acabado mediante fresado de la aleación de aluminio Produx.
- La investigación se desarrolló en base a 2 sistemas de lubricación que son: por mínima cantidad de lubricación (MQL) y por inundación, bajo diferentes parámetros de corte para el proceso de fresado en planeado del aluminio 7075 – T6, tanto en desbaste como acabado; obteniendo una mínima variación de la rugosidad superficial Ra entre 0,008 % y 0,009 % para velocidad de corte constante de 450 m/min, avance por diente $\leq 0,1$ mm, profundidad por pasada de 2 mm para desbaste y 0,3 mm para acabado, concluyendo que para dichos parámetro de corte se puede emplear indistintamente cualquiera de los 2 métodos de lubricación obteniendo resultados similares en el acabado superficial.
- Se determinó que para el desbaste del aluminio Produx con una velocidad de corte de 450 m/min, avance por diente $> 0,1$ mm y profundidad de 2 mm la condición ideal de lubricación es la efectuada mediante el método de inundación obteniendo una mejora en los valores de rugosidad superficial Ra de un 60 % con respecto a un sistema MQL con caudal de 50 ml/h y del 58 % con respecto a un sistema MQL con 25 ml/h de caudal.
- Se puede concluir que para el proceso de acabado superficial de Aluminio 7075-T6 con velocidad de corte constante de 450 m/min, avance por diente entre 0,1 - 0,3 mm, y 0,3 mm de profundidad por pasada, las condiciones de rugosidad Ra mejoran sustancialmente con la implementación del sistema MQL puesto que el valor de Ra disminuye en un 36 % con caudal de 50 ml/h y del 12 % con caudal de 25 ml/h, respecto al sistema de lubricación por inundación.

- Conforme a la investigación se determinó que los valores de rugosidad más bajos obtenidos, son de 1,144 μm para desbaste y 0,506 μm para acabado equivalentes a grado de rugosidad N6 y N5 (pulido fino) respectivamente, los mismos que se obtuvieron con la implementación del sistema de mínima cantidad de lubricación con caudal de 50 ml/h.
- Finalmente se puede concluir que para un proceso de fresado por planeado para acabado de aluminio Produx, la utilización de un sistema de lubricación por mínima cantidad es la mejor alternativa en cuanto a parámetros de rugosidad y costo puesto que en las referencias citadas se indica que los valores por filtrado para reutilización y eliminación de desechos de los lubricantes puede ascender hasta un 10 % del costo de producción.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar experimentos utilizando la técnica MQL únicamente para un acabado superficial con una profundidad de 0,2 mm a 0,5 mm debido que en la investigación realizada se observó que para procesos de desbaste los valores obtenidos de rugosidad se ven considerablemente afectados al aplicar el sistema de mínima cantidad de lubricación respecto al sistema por inundación.
- Se recomienda utilizar una velocidad de corte constante de 450m/min y profundidad de 0,3 mm para obtener mejoras en la rugosidad ya que el valor de Ra podrá disminuir entre un 36 % y 12 % utilizando un caudal de MQL de 50 ml/h y 25 ml/h.
- Realizar nuevos diseños experimentales, tomando en consideración el desgaste de la herramienta puesto que este factor tiene una incidencia directa en el acabado superficial de los elementos de estudio.
- Se sugiere realizar ensayos futuros con el dispositivo MQL utilizando mecanizado en seco o tasas de flujo de lubricante inferiores a los 25 ml/h.
- Efectuar posteriores estudios de comparación entre el sistema MQL y el sistema tradicional de lubricación por inundación para el maquinado de materiales distintos a la aleación de Aluminio 7075-T6.
- Se recomienda realizar estudios sobre al incremento progresivo de temperatura en el proceso de maquinado para generar estrategias que minimicen el uso de lubricación en función de esta magnitud.

REFERENCIAS

- [1] T. Cock, Aluminum a light metal: a brief introduction to aluminum, Noruega, 1999.
- [2] Z. Huda, T. Ni y T. Zaharinie, «An aerospace Aluminum alloy,» *Mater Chem Phys*, vol. 2, nº 3, pp. 515-517, 2009.
- [3] J. Hatch, «Aluminum: Properties and physical metallurgy,» *American Society for metals*, nº 6, p. 624, 1984.
- [4] M. Toledano, M. Arenas, J. Galán, L. Ramirez, S. Borja, A. Conde y A. Monsalve, «Resistencia a la fatiga de la aleación de aluminio 7075-T6 en función del tipo de ensayo y espesor del recubrimiento,» *Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM/CESIC)*, 2016.
- [5] A. Coque, «Análisis del desgaste por filo de aportación en herramientas de mecanizado para aluminio AA 7075-T6 (Prodax) en el proceso de fresado plano en un centro de mecanizado,» *ESPE*, p. 110, 2018.
- [6] J. Chanataxi y R. Villacis, «Determinación de estrategias de mecanizado tres ejes de superficies concavas y convexas en aluminio en -AW-7075,» *Universidad Politécnica Salesiana*, pp. 1-111, 2018.
- [7] ASSAB, «PRODAX,» pp. 399-404, 2017.
- [8] L. López y J. Sánchez, Mecanizado de Alto Rendimiento, BILBAO(España): Izaro S.A, 2004.
- [9] P.F.I.N.D.E, «Titulación: Ingeniero industrial superior por generación mediante sistema mql,» 2010.
- [10] L. Lacalle, «Experimental and numerical investigation of the effect of spray cutting fluids in high speed milling.,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 1, pp. 11-15, 2006.
- [11] A. Osorio, «Efecto del método de suministro del fluido de corte en la integridad de superficie en el fresado frontal de la aleación aluminio 7075,» *Procesos de Manufactura y Metalurgia*, p. 127, 2018.

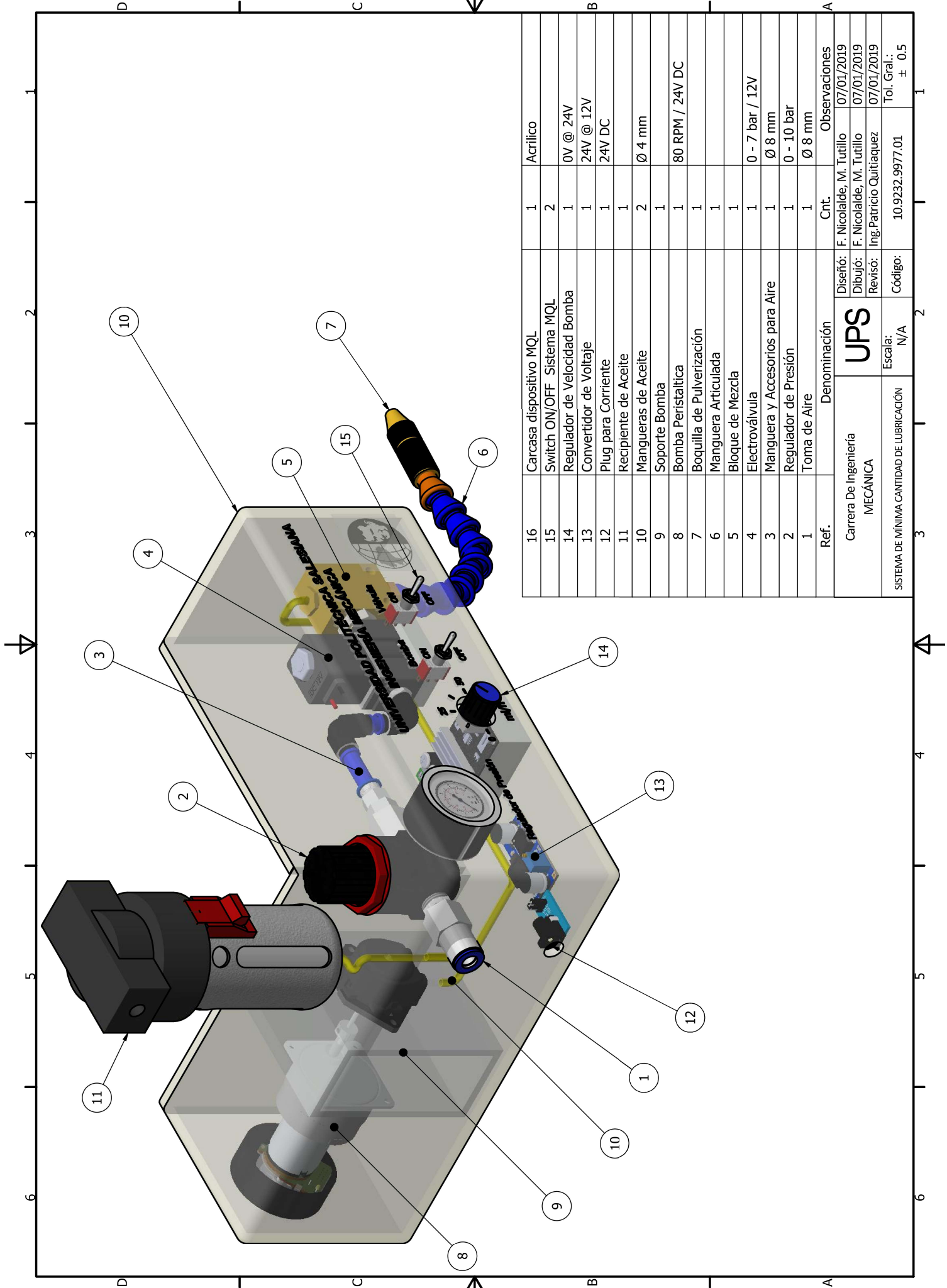
- [12] A. Senthil y M. Rahman, «Effect of high-Pressure Coolant on Machining Performance,» *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, n° 20, pp. 83-91, 2002.
- [13] I. Inasaki y J. Sutherland, «Dry machining and minimum quantity lubrication,» *Annals of the Cirp*, vol. 2, pp. 511-537, 2004.
- [14] M. Baradie, «Cutting Fluid Part I charecterization.,» *Journal of Materials Processing Technol*, n° 56, pp. 786-797, 1996.
- [15] F. Aleksandar y D. Stephenson, «Minimum Quatity Lubrication (MQL),» *Machining Science and Technology*, vol. 10, pp. 3-22, 2006.
- [16] B. Eker, B. Ekici y M. Kurt, «Sustainable machining of the magnesium alloy materials in the CNC lathe machine and optimization of the cutting conditions,» *MECHANIKA*, vol. 20, n° 3, pp. 310-316, 2014.
- [17] B. García y G. Vara, «INTEREMPRESAS,» 11 03 2019. [En línea]. Available: [https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/98474-Fabricacion-sostenible-Lubricacion-por-cantidades-minimas-\(MQL\).html](https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/98474-Fabricacion-sostenible-Lubricacion-por-cantidades-minimas-(MQL).html). [Último acceso: 13 MARZO 2019].
- [18] M. Mariño y C. Sánchez, «Influencia de los regímenes de lubricación en la vida de la herramienta y el acabado superficial del fresado de aceros endurecidos AISI D2 y AISI D6,» *Minería y Geología*, pp. 62-78, 2015.
- [19] K. Vasco, «Catálogo de parámetros de corte,» vol. 1, n° 1, pp. 32-102, 2014.
- [20] T. Camacho, J. Reyes, O. Nieto, A. Millán y S. Rincón, «Resistencia al corte en discontinuidades con diferentes grados de rugosidad,» *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 19, n° 1, pp. 55-70, 2009.
- [21] C. Carvajal y J. Cocha, «Estudio de la influencia de los parámetros de corte y geometría con herramienta de acero rápido en proceso de mecanizado en el polímero poliamida 6,» p. 139, 2018.
- [22] L. Ilizaliturri, «Acabado superficial,» *Haiku Deck*, vol. 1, n° 1, pp. 13-25, 2015.
- [23] A. Attanasio, «Minimal quantity lubrication in turning,» vol. 3, pp. 333-338, 2006.
- [24] J. Rendón, «Reguladores de Presión,» *Webside*, vol. 1, n° 1, pp. 2-6, 2006.

- [25] Burkert, «Fluid Control Systems,» Burkert, [En línea]. Available: <https://www.burkert.es/es/products/valvulas-de-solenoide/solenoides-2-2-para-uso-general/65438>. [Último acceso: 12 Mayo 2019].
- [26] J. Gonzalez, «La Dosificación y Pulverización de Fluidos Aplicados en Procesos Industriales,» *Tesis UNS*, vol. 1, n° 1, pp. 45-140, 2015.
- [27] M. Libre. [En línea]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-420704433-bomba-peristaltica-12-vdc-dosificadora-proyectos-arduino-_JM?quantity=1. [Último acceso: Mayo 12 2019].
- [28] Rambal, «Rambal Automatización y Robótica,» [En línea]. Available: <https://rambal.com/control-motores/1026-regulador-velocidad-pwm-para-motores-y-cargas-de-cc.html>. [Último acceso: 12 Abril 2019].
- [29] M. Sony, «Sony Mag,» [En línea]. Available: <https://www.sonymag.es/ap1501a-12-circuito-integrado-regulador-conversor-dcdc-150khz-12v5a-to220-5-12923-p.asp>. [Último acceso: 12 Mayo 2019].
- [30] Damia, «Damia Solar,» [En línea]. Available: https://www.damiasolar.com/apresentar/blog/articulos-sobre-la-energia-solar-y-sus-componentes/blog-202-por_1. [Último acceso: 12 Abril 2019].
- [31] AWS, «AWS Fabricación de Componentes Plásticos y Eléctricos,» [En línea]. Available: <http://www.awsplastic.com/es/manguera-articulada-flexibles.html>. [Último acceso: 12 Abril 2019].
- [32] EXAIR, «Compressed Air Products,» [En línea]. Available: http://spanish.exair.com/atomizingnozzles/InternalMix.php?gclid=CjwKCAjwiN_mBRBBEiwA9N-e_oxmtA5vPPgV0I175CkWYYLzfaHKbNGxc_yFgBV_sAFs2kmSkAJfpoxoCVTAQAvD_BwE. [Último acceso: 12 Abril 2019].
- [33] RS, «RS Mangueras de Aire Comprimido,» [En línea]. Available: <https://es.rs-online.com/web/c/neumatica-hidraulica-y-transmision-de-potencia/mangueras-de-aire-comprimido-y-tubos-para-neumatica/manguera-de-aire-comprimido/>. [Último acceso: 12 Abril 2019].

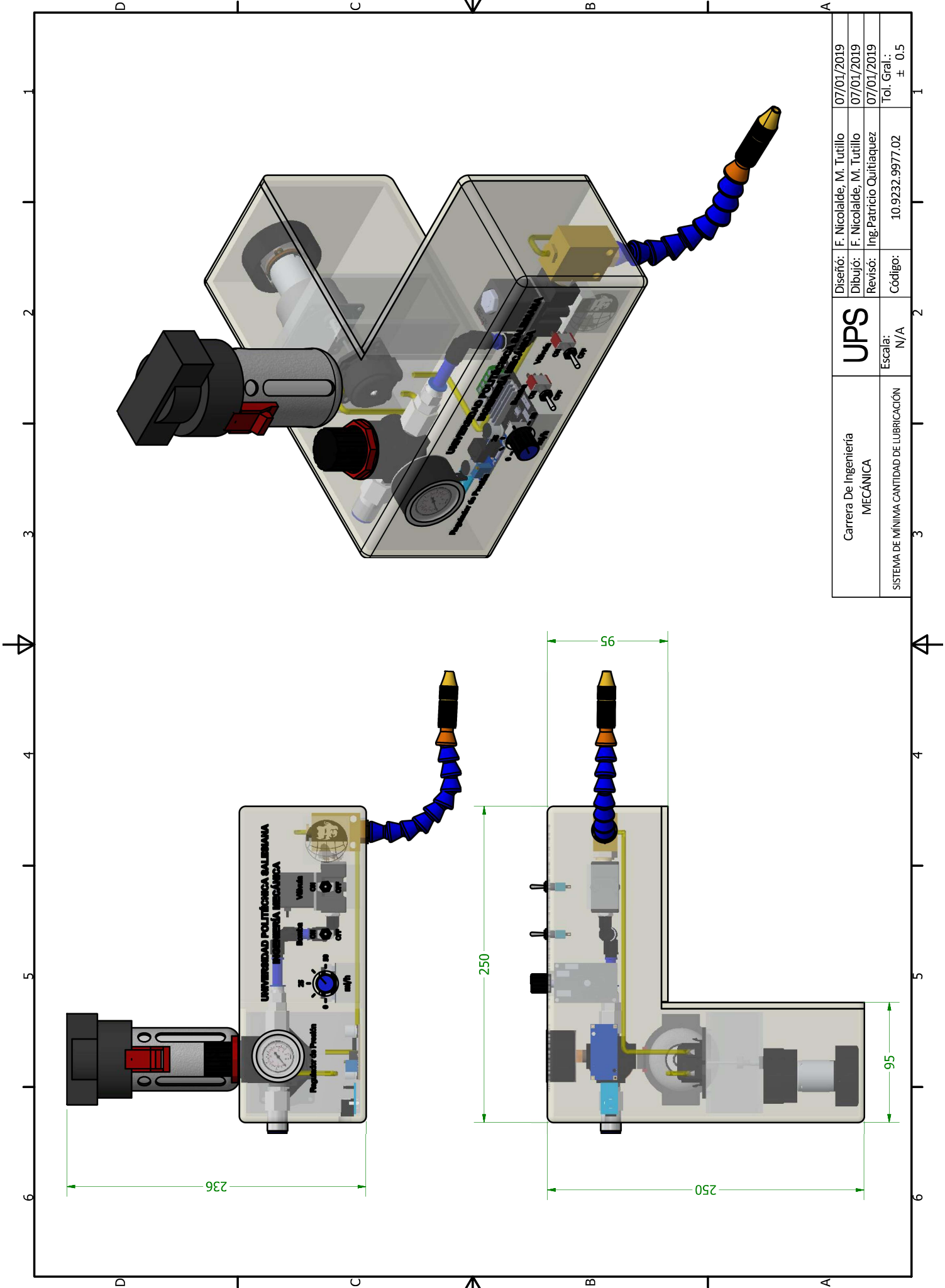
- [34] A. Balone, «INDUSTRIAL STEAM,» 04 Octubre 2014. [En línea]. Available: <http://comofunciona.org/que-es-y-como-funciona-un-interruptor/>. [Último acceso: 12 Abril 2019].
- [35] E. Goyes, «SCRIBD,» 16 Marzo 2016. [En línea]. Available: <https://www.scribd.com/document/303731374/Deposito-de-Aceite>. [Último acceso: 12 Abril 2019].
- [36] M. Libre, «Mercado Libre,» [En línea]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-420081766-adaptador-fuente-de-poder-corriente-24v-3a-switch-modem-_JM?quantity=1. [Último acceso: 12 Abril 2019].
- [37] T. Walker, «The mql hanbook,» *A guide to machining with Minimum Quantity Lubrication*, pp. 1-2, 2015.
- [38] Mitsubishi, «Catálogo General,» *Mitsubishi Materials*, vol. 2, p. 1352, 2014.
- [39] Galán. Cesar, «Optimización del proceso de tallado por generación mediante sistema MQL (Lubricación por cantidades mínimas),» *Jhon Deere*, vol. 1, nº 1, p. 212, 2010.
- [40] Wurt, «Fluido de Corte Multi-WFC,» *Fluido de Corte Multi-WFC*, nº 1, p. 2.
- [41] Chevron, «Chevron Soluble Oil D,» *Chevron*, pp. 31-33, 2012.
- [42] SN, «Catalogo Mitutoyo,» 2016.
- [43] Tosun.N, Huseyinoglu.M, «Effect of MQL ion surface roughness in milling og AA7075-T6,» *Advanced Materials and Manufacturing Processes*, nº 25, pp. 793-798, 2010.

ANEXOS

Anexo 1: Planos



16	Carcasa dispositivo MQL	1	Acrílico
15	Switch ON/OFF Sistema MQL	2	
14	Regulador de Velocidad Bomba	1	0V @ 24V
13	Convertidor de Voltaje	1	24V @ 12V
12	Plug para Corriente	1	24V DC
11	Recipiente de Aceite	1	
10	Mangueras de Aceite	2	Ø 4 mm
9	Soporte Bomba	1	
8	Bomba Peristáltica	1	80 RPM / 24V DC
7	Boquilla de Pulverización	1	
6	Manguera Articulada	1	
5	Bloque de Mezcla	1	
4	Electroválvula	1	0 - 7 bar / 12V
3	Manguera y Accesorios para Aire	1	Ø 8 mm
2	Regulador de Presión	1	0 - 10 bar
1	Toma de Aire	1	Ø 8 mm
Ref.	Denominación	Cnt.	Observaciones
	UPS		
	Carrera De Ingeniería MECÁNICA		Diseño: F. Nicolalde, M. Tuttillo 07/01/2019
			Dibujó: F. Nicolalde, M. Tuttillo 07/01/2019
			Revisó: Ing. Patricio Quitiaquez 07/01/2019
	ESCALA: N/A	Código: 10.9232.9977.01	Tol. Gral.: ± 0.5
SISTEMA DE MÍNIMA CANTIDAD DE LUBRICACIÓN		3	2



Carrera De Ingeniería MECÁNICA	UPS	Diseño:	F. Nicolalde, M. Tuttillo	07/01/2019		
		Dibujó:	F. Nicolalde, M. Tuttillo	07/01/2019		
		Revisó:	Ing. Patricio Quitiaquez	07/01/2019		
SISTEMA DE MÍNIMA CANTIDAD DE LUBRICACIÓN	Escala:	N/A	Código:	10.9232.9977.02	Tol. Gral.:	± 0.5

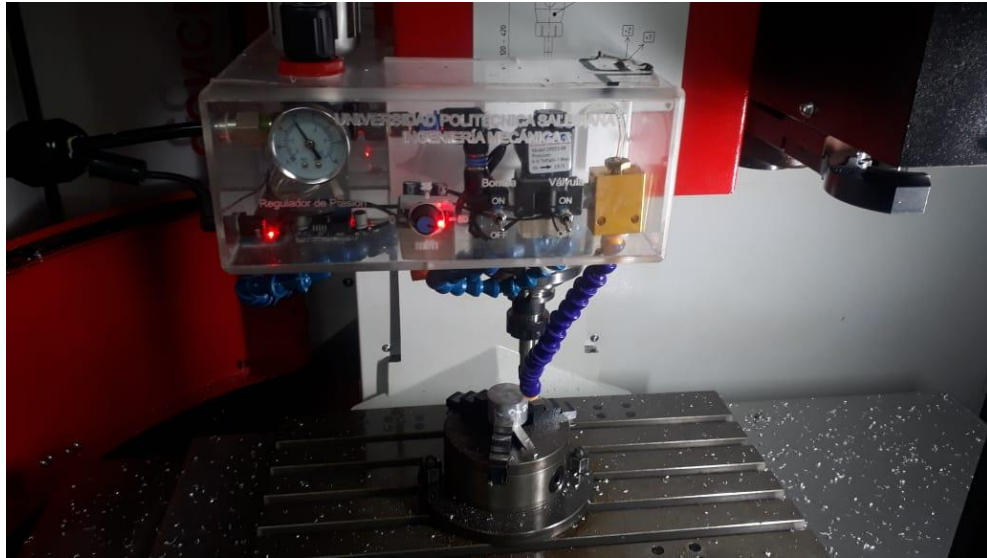
Anexo 2: Evidencia fotográfica



Fotografía 1. Construcción del equipo MQL
Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo



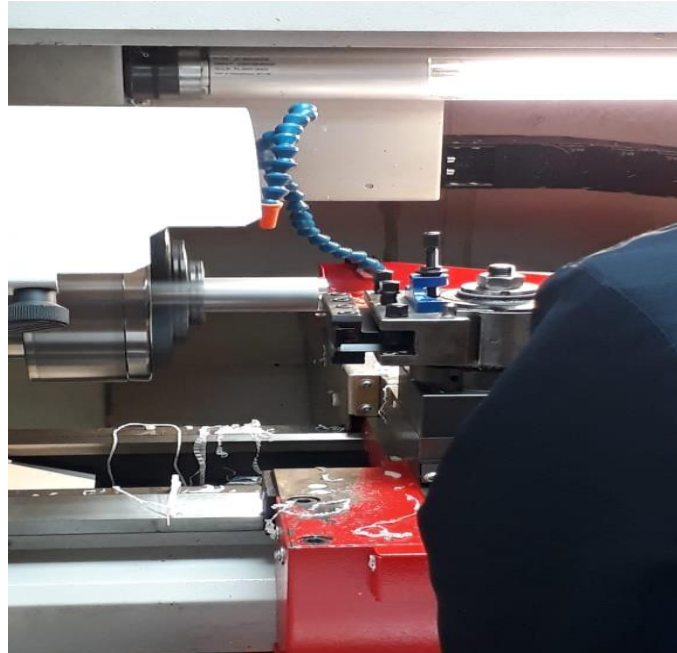
Fotografía 1. Selección del material Aluminio 7075-T6.
Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo



Fotografía 2. Instalación del dispositivo MQL en el centro de Mecanizado CNC.
Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

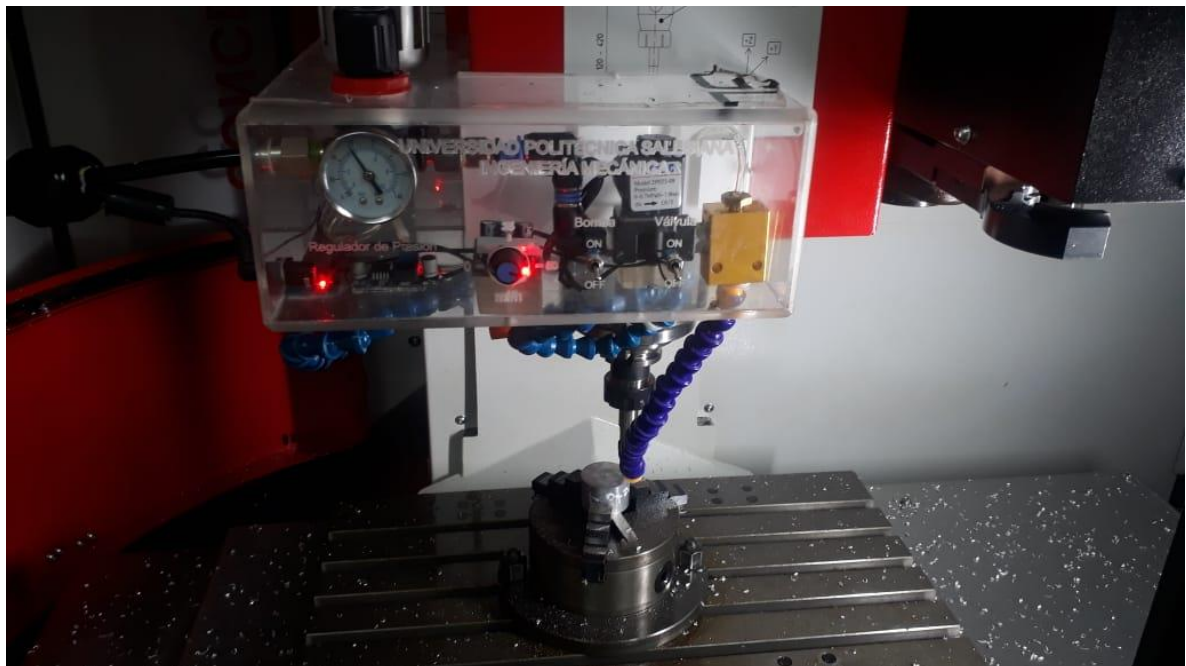


Fotografía 3. Elaboración del programa cilindrado para el maquinado en torno de
probetas. Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo

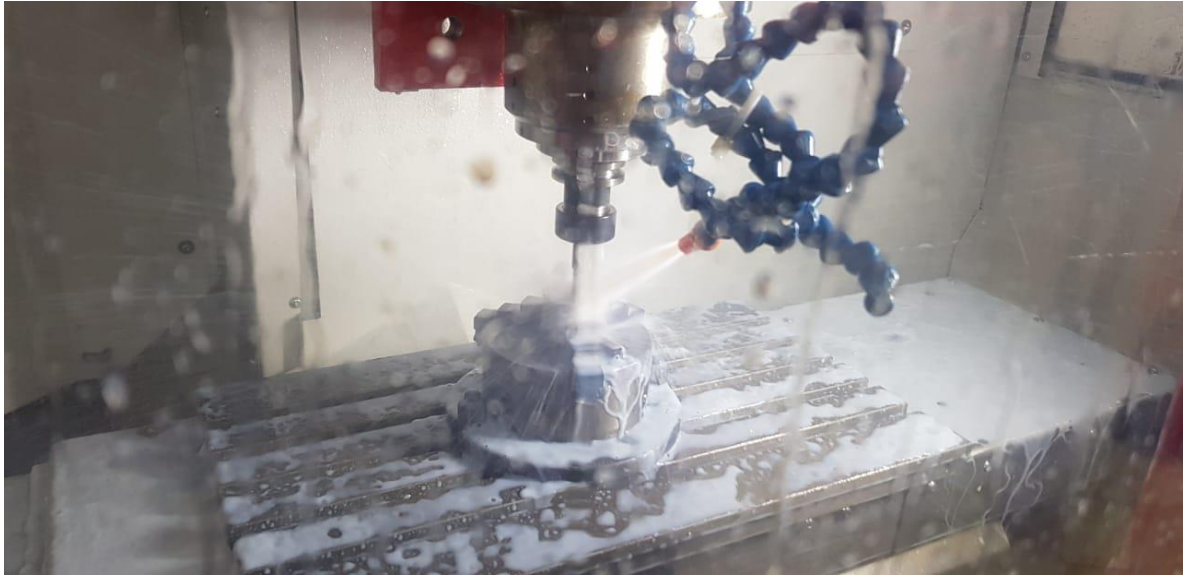


Fotografía 4. Cilindrado de probetas.

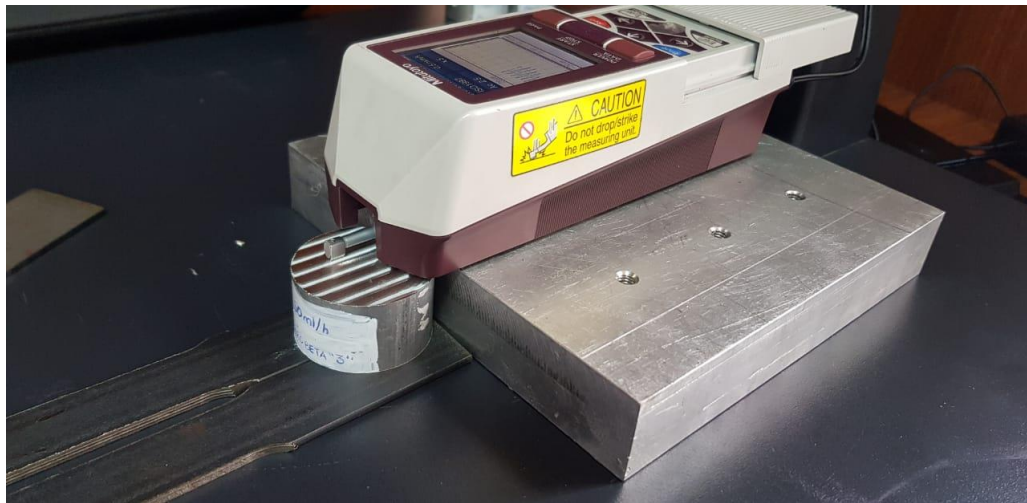
Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo



Fotografía 5. Maquinado de probetas utilizando sistema MQL de 50 ml/h y 25 ml/h con una profundidad de 2 mm y 0,3 mm. Elaborador por: Sebastián Nicolalde y Mario Tutillo



Fotografía 6. Maquinado de probetas utilizando un sistema por inundación utilizando una profundidad de 2mm y 0,3mm. Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo



Fotografía 7. Utilización del Rugosímetro Mitutoyo.
Elaborado por: Sebastián Nicolalde & Mario Tutillo