

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA DE:  
INGENIERÍA MECÁNICA**

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

**TEMA:  
ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA INFLUENCIA DEL SISTEMA DE  
MÍNIMA CANTIDAD DE LUBRICACIÓN CON ACEITE VEGETAL Y  
SINTÉTICO EN OPERACIONES DE FRESADO CNC DEL ACERO AISI  
4140.**

**AUTORES:  
FRANCISCO JAVIER CALLE OVIEDO  
JEFFERSON FABRICIO VALENCIA LESCOANO**

**TUTOR:  
RENÉ PATRICIO QUITIAQUEZ SARSOZA**

**Quito, agosto del 2020**

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Nosotros, Francisco Javier Calle Oviedo y Jefferson Fabricio Valencia Lescano, con documentos de identificación N° 1900536747 y N° 1718550450, respectivamente manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Trabajo de Titulación intitulado: “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA INFLUENCIA DEL SISTEMA DE MÍNIMA CANTIDAD DE LUBRICACIÓN CON ACEITE VEGETAL Y SINTÉTICO EN OPERACIONES DE FRESADO CNC DEL ACERO AISI 4140.”, 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 forma digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



---

Francisco Javier Calle Oviedo  
C.I. 1900536747



---

Jefferson Fabricio Valencia Lescano  
C.I. 1718550450

Quito, agosto 2020

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR**

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Trabajo de Titulación “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA INFLUENCIA DEL SISTEMA DE MÍNIMA CANTIDAD DE LUBRICACIÓN CON ACEITE VEGETAL Y SINTÉTICO EN OPERACIONES DE FRESADO CNC DEL ACERO AISI 4140.” realizado por Francisco Javier Calle Oviedo y Jefferson Fabricio Valencia Lescano, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, agosto 2020.



C.I. 1710597269

---

René Patricio Quitiaquez Sarsoza

C.I. 1710597269

## **DEDICATORIA**

Dedico este Trabajo de Titulación a mis padres, Pedro y Maura, por enseñarme el camino de la perseverancia y, además, inculcarme valores; por sus alientos para no flaquear en este proceso importante de mi formación profesional y poder culminar de esta manera un sueño.

A mis hermanas, Carina y Mayra, por su cariño y apoyo incondicional porque a pesar de la distancia me han apoyado en todo momento.

Finalmente, lo más importante, deseo dedicar este Trabajo de Titulación a Eliana, mi esposa; y, a mi hija, Valentina, pilares fundamentales en mi vida... Ustedes son el motivo de mi superación diaria, han compartido los buenos y malos momentos, en este arduo trayecto... ¡Gracias por su amor y su comprensión, día tras día!

*Francisco Javier*

**“He aquí mi secreto, que no puede ser más simple: Sólo con el corazón se puede ver bien. Lo esencial es invisible para los ojos”.**

**Antoine de Saint-Exupéry**

A mis padres, José y Ligia, que han sido mi apoyo y fortaleza durante toda mi vida; a mi hermana, María José, que con su ejemplo me ha demostrado que con esfuerzo y dedicación todo es posible; a mi cuñado, Andrés, por ser mi maestro y guiarme en el camino del autoconocimiento; a mi novia, Carolina, por ser mi apoyo en la culminación de mi formación académica.

*Jefferson Fabricio*

## **AGRADECIMIENTO**

Principalmente, a mi familia por darme su apoyo incondicional para culminar con éxito mi Carrera universitaria; a mis maestros, quienes han compartido conmigo sus conocimientos... De ustedes me llevo su sabiduría y amistad.

A mi tutor... gracias por darme la oportunidad de realizar este Trabajo de Titulación bajo su guía; y, a los docentes de Laboratorios, quienes me han colaborado con su conocimiento y asesoría fundamental a lo largo de este proyecto.

Finalmente, a la Universidad Politécnica Salesiana, una Institución que forma profesionales competentes, sin dejar de lado los principios y valores fundamentales en la vida.

*Francisco Javier*

A todas aquellas personas que me han acompañado a lo largo de mi vida, tanto personal como profesional. Mi infinito agradecimiento puesto que sus consejos, apoyo, tiempo, conocimientos y, en especial, el hecho de que hayan puesto su fe en mí ha sido un gran compromiso y espero haber correspondido de la misma manera.

A los docentes de la Carrera de Ingeniería Mecánica por haber compartido sus conocimientos y experiencias durante las horas de clase; en especial, a mi tutor Patricio Quitiaquez y al personal de Laboratorio.

*Jefferson Fabricio*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

|   |      |
|---|------|
| CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....                          | i.   |
| DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR.....          | ii.  |
| DEDICATORIA .....   | iii. |
| AGRADECIMIENTO.....                                       | iv.  |
| ÍNDICE DE CONTENIDO.....                                  | v.   |
| RESUMEN.....  | vi.  |
| ABSTRACT .....  | vii. |
| CAPÍTULO I.....   | 1    |
| GENERALIDADES .....                                       | 1    |
| 1.1. Sistema de Mínima Cantidad de Lubricación .....      | 1    |
| 1.2. Fluidos de corte .....                               | 3    |
| 1.2.1. Aceite vegetal .....                               | 3    |
| 1.2.2. Aceite sintético .....                             | 4    |
| 1.3. Operaciones de fresado CNC .....                     | 4    |
| 1.3.1. Mecanizado de alta velocidad.....                  | 6    |
| 1.4. Parámetros de corte para operaciones de fresado..... | 6    |
| 1.4.1. Velocidad de corte ( $V_c$ ).....                  | 6    |
| 1.4.2. Avance por diente ( $f_z$ ) .....                  | 6    |
| 1.4.3. Profundidad de corte ( $a_p$ ) .....               | 7    |
| 1.4.4. Velocidad de avance ( $V_f$ ) .....                | 7    |
| 1.4.5. Diámetro efectivo ( $D_{eff}$ ) .....              | 8    |
| 1.5. Estrategias de mecanizado.....                       | 8    |
| 1.5.1. Acabado en paralelo.....                           | 8    |
| 1.5.2. Contorno .....                                     | 9    |
| 1.5.3. Espiral 3D .....                                   | 9    |
| 1.5.4. Radial.....  | 10   |

|                     |  |    |
|---------------------|--|----|
| 1.5.5.              | Trayectorias vortex de 3D.....                       | 10 |
| 1.6.                | Acero AISI 4140.....                                 | 11 |
| 1.6.1.              | Propiedades del acero AISI 4140.....                 | 11 |
| 1.6.2.              | Características del acero AISI 4140.....             | 12 |
| 1.7.                | Herramienta .....                                    | 13 |
| 1.8.                | Calidad o rugosidad superficial .....                | 15 |
| 1.8.1.              | Rugosidad media aritmética ( $R_a$ ).....            | 16 |
| 1.8.2.              | Rugosidad de la raíz media cuadrática ( $R_q$ )..... | 17 |
| 1.8.3.              | Profundidad media de rugosidad ( $R_z$ ) .....       | 17 |
| 1.9.                | Equipo de medición.....                              | 18 |
| 1.10.               | Metodología Taguchi.....                             | 19 |
| 1.10.1.             | Arreglo ortogonal (AO).....                          | 20 |
| 1.11.               | Análisis de varianza ANOVA.....                      | 20 |
| 1.11.1.             | Variables del análisis ANOVA.....                    | 21 |
| 1.11.2.             | Varianza.....  | 21 |
| 1.11.3.             | Prueba F de Fisher .....                             | 21 |
| 1.11.4.             | Porcentaje de influencia P.....                      | 22 |
| 1.11.5.             | Prueba de la hipótesis .....                         | 22 |
| 1.11.6.             | Hipótesis nula ( $H_0$ ).....                        | 23 |
| 1.11.7.             | Hipótesis alternativa ( $H_1$ ).....                 | 23 |
| CAPÍTULO II .....   |  | 24 |
| GENERALIDADES ..... |  | 24 |
| 2.1.                | Metodología de la experimentación .....              | 24 |
| 2.2.1.              | Diseño de la experimentación.....                    | 24 |
| 2.3.                | Parámetros de corte .....                            | 25 |
| 2.4.                | Estrategia de mecanizado .....                       | 25 |
| 2.5.                | Definición de niveles y parámetros de fresado.....   | 26 |

|                              |   |    |
|------------------------------|---|----|
| 2.6.                         | Diseño CAD .....  | 26 |
| 2.7.                         | Diseño CAM.....   | 27 |
| 2.8.                         | Programación CAM.....   | 28 |
| 2.9.                         | Arreglo ortogonal del método Taguchi .....                        | 29 |
| 2.10.                        | Resultados de rugosidad media aritmética (Ra) .....               | 30 |
| CAPÍTULO III.....            |   | 33 |
| ANÁLISIS DE RESULTADOS ..... |   | 33 |
| 3.1.                         | Análisis de rugosidad media (Ra) de la experimentación .....      | 33 |
| 3.2.                         | Análisis de rugosidad media (Ra) obtenida por variación MQL.....  | 34 |
| 3.3.                         | Análisis de rugosidad media (Ra) por velocidad de corte.....      | 36 |
| 3.4.                         | Análisis de rugosidad (Ra) media por avance por diente (fz) ..... | 37 |
| 3.5.                         | Rugosidad por variación MQL en velocidad de corte.....            | 39 |
| 3.6.                         | Rugosidad por variación de avance (fz) en velocidad de corte..... | 40 |
| 3.7.                         | Método ANOVA .....  | 42 |
| 3.7.1.                       | Modelo de cálculo para el factor A.....                           | 42 |
| 3.7.2.                       | Prueba F .....  | 44 |
| 3.7.3.                       | Prueba de la hipótesis .....                                      | 45 |
| 3.7.4.                       | Análisis de varianza.....   | 46 |
| 3.8.                         | Óptimos niveles de mecanizado .....                               | 47 |
| 3.9.                         | Predicción de rugosidad .....                                     | 47 |
| 3.10.                        | Comprobación de la rugosidad predicha .....                       | 49 |
| 3.11.                        | Intervalo de confianza.....                                       | 50 |
| 3.12.                        | Costos.....   | 53 |
| 3.12.1.                      | Costos directos de materiales y herramientas .....                | 53 |
| 3.12.2.                      | Costos directos de equipos y servicios .....                      | 54 |
| 3.12.3.                      | Costos indirectos.....  | 54 |
| 3.12.4.                      | Costos totales .....  | 55 |



|                       |    |
|-----------------------|----|
| CONCLUSIONES .....    | 56 |
| RECOMENDACIONES ..... | 57 |
| REFERENCIAS .....     | 59 |

## Índice de tablas

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1.</b> Propiedades físicas y químicas del aceite de oliva de origen vegetal. ....   | 3  |
| <b>Tabla 2.</b> Datos técnicos fluido de corte Multi – WFC. ....   | 4  |
| <b>Tabla 3.</b> Propiedades químicas del acero bonificado AISI 4140 . ....   | 12 |
| <b>Tabla 4.</b> Propiedades físicas y mecánicas del acero AISI 4140 .....  | 12 |
| <b>Tabla 5.</b> Características AISI 4140 .....  | 13 |
| <b>Tabla 6.</b> Especificaciones de fresa punta esférica GUHRING.....  | 14 |
| <b>Tabla 7.</b> Medidas de fresa punta esférica GUHRING.....   | 14 |
| <b>Tabla 8.</b> Especificaciones del rugosímetro MITUTOYO SJ210.....   | 18 |
| <b>Tabla 9.</b> Variables del análisis ANOVA .....   | 21 |
| <b>Tabla 10.</b> Niveles y parámetros independientes.....  | 26 |
| <b>Tabla 11.</b> Resultados obtenidos de velocidad de avance y velocidad de corte efectiva.<br>.....                                     | 27 |
| <b>Tabla 12.</b> Arreglo Taguchi ortogonal (AO) L27 para la experimentación.....   | 29 |
| <b>Tabla 13.</b> Ordenamiento de las combinaciones de parámetros y factores. ....  | 30 |
| <b>Tabla 14.</b> Resultados de Rugosidad (Ra). ....  | 31 |
| <b>Tabla 15.</b> Experimento con mejor valor de rugosidad (Ra). ....   | 34 |
| <b>Tabla 16.</b> Rugosidad media por variación de MQL.....   | 34 |
| <b>Tabla 17.</b> Reducción del porcentaje del mejor resultado con respecto al resto por la<br>variación de MQL. ....                     | 35 |
| <b>Tabla 18.</b> Rugosidad media por variación de velocidad de corte.....  | 36 |
| <b>Tabla 19.</b> Reducción del porcentaje del mejor resultado con respecto a los demás por<br>variación de velocidad de corte (Vc). .... | 37 |
| <b>Tabla 20.</b> Rugosidad media por variación de avance por diente (fz). ....   | 37 |
| <b>Tabla 21.</b> Reducción del porcentaje del mejor resultado con respecto a los demás por<br>variación de velocidad de corte (Vc). .... | 38 |
| <b>Tabla 22.</b> Valores que toman los factores variables para obtener la mejor calidad<br>superficial.....                              | 39 |
| <b>Tabla 23.</b> Rugosidad por variación MQL en velocidad de corte (Vc). ....  | 39 |
| <b>Tabla 24.</b> Rugosidad por variación de avance (fz) en velocidad de corte.....   | 41 |
| <b>Tabla 25.</b> Distribución F ( $\alpha = 0,05$ en la cola a la derecha) .....   | 44 |
| <b>Tabla 26.</b> Resultados método ANOVA.....  | 45 |
| <b>Tabla 27.</b> Resultados de varianza de los niveles según sus parámetros.....   | 46 |
| <b>Tabla 28.</b> Porcentaje de error de las mediciones vs. rugosidad calculada. ....   | 49 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 29.</b> Adecuados parámetros de mecanizado .....    | 50 |
| <b>Tabla 30.</b> Valor de rugosidad menor del estudio .....  | 53 |
| <b>Tabla 31.</b> Costo de materiales y herramientas.....     | 53 |
| <b>Tabla 32.</b> Costos directos de equipos y servicios..... | 54 |
| <b>Tabla 33.</b> Costos indirectos .....                     | 54 |
| <b>Tabla 34.</b> Costo total del estudio.....                | 55 |

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.</b> Sistema de cantidad mínima de lubricación externa e interna.....  | 2  |
| <b>Figura 2.</b> Máquina fresadora CNC.....  | 5  |
| <b>Figura 3.</b> Operaciones de fresado.....   | 5  |
| <b>Figura 4.</b> Avance por filo por fresado periférico .....  | 7  |
| <b>Figura 5.</b> Diámetro efectivo en corte de fresas esféricas .....  | 8  |
| <b>Figura 6.</b> Acabado en paralelo .....   | 9  |
| <b>Figura 7.</b> Mecanizado de contorno.....   | 9  |
| <b>Figura 8.</b> Mecanizado en espiral 3D .....  | 10 |
| <b>Figura 9.</b> Estrategia de mecanizado radial .....   | 10 |
| <b>Figura 10.</b> Estrategia trayectoria Vortex 3D .....   | 11 |
| <b>Figura 11.</b> Fresa de acabado punta esférica. ....  | 14 |
| <b>Figura 12.</b> Parámetros de corte de fresa punta esférica.....   | 15 |
| <b>Figura 13.</b> Medición de la rugosidad de superficie.....  | 15 |
| <b>Figura 14.</b> Descripción de las variables en la medición de la rugosidad superficial  | 16 |
| <b>Figura 15.</b> Valor de media aritmética.....   | 17 |
| <b>Figura 16.</b> Representación de la profundidad media de rugosidad.....   | 18 |
| <b>Figura 17.</b> Rugosímetro MITUTOYO SJ210 .....   | 19 |
| <b>Figura 18.</b> Esquema de formulación experimental para evaluar la calidad de la superficie obtenida en términos de rugosidad superficial (Ra), por fresado 3D del acero AISI 4140..... | 25 |
| <b>Figura 19.</b> Probeta modelo CAD para la experimentación. ....   | 27 |
| <b>Figura 20.</b> Contorno en Descenso (CD).....   | 28 |
| <b>Figura 21.</b> Medición de la rugosidad superficial.....  | 31 |
| <b>Figura 22.</b> Rugosidad obtenida en cada ensayo. ....  | 33 |
| <b>Figura 23.</b> Rugosidad Ra media vs variación MQL.....   | 35 |
| <b>Figura 24.</b> Rugosidad media vs variación de velocidad de corte Vc.....   | 36 |
| <b>Figura 25.</b> Rugosidad Ra media vs variación de avance por diente (fz).....   | 38 |
| <b>Figura 26.</b> Variación de rugosidad por MQL en velocidad de corte.....  | 40 |
| <b>Figura 27.</b> Variación de rugosidad por avance (fz) en velocidad de corte.....  | 41 |
| <b>Figura 28.</b> Efecto de los factores en operaciones de fresado 3D. ....  | 47 |
| <b>Figura 29.</b> Superficie de Ra [ $\mu\text{m}$ ] vs. fz [mm/diente]; Vc [m/min] .....  | 48 |
| <b>Figura 30.</b> Variación de la rugosidad dada por el instrumento de medición. ....  | 50 |

## RESUMEN

El presente trabajo estudia la calidad superficial que se obtiene en el mecanizado de Fresado - acabado 3D del acero AISI 4140, usando aceite sintético y vegetal con un sistema de mínima cantidad de lubricación MQL, por sus siglas en inglés, con variaciones de 25 [ml/h] y 50 [ml/h] para mecanizar en superficies con diferentes inclinaciones. Se estudia la calidad de superficie mediante el uso del rugosímetro al medir la rugosidad ( $R_a$ ). En los ensayos, se varían, además, los parámetros de corte como la velocidad de corte ( $V_c$ ) y el avance por diente ( $f_z$ ) según las recomendaciones del fabricante de la herramienta utilizada para el acabado, se mantiene sin variación la velocidad del husillo en 6000 [rpm] con profundidad de corte en 0,2 [mm]. La probeta para realizar el mecanizado contiene tres pendientes de  $57^\circ$ ,  $63^\circ$  y  $70^\circ$  diseñados en CAD, de esta manera se varía la velocidad efectiva de corte en la punta de la herramienta fresa redonda de diámetro 14 [mm] con revestimiento de nitruro de titanio (TiN) y nitruro de aluminio con titanio (TiAlN), denominado FIREX.

La metodología utilizada es la planteada por Genichi Taguchi, metodología estadística basada en arreglos ortogonales que simplifican el número de ensayos, en este caso se ha realizado 27 experimentos, combinando para ello los factores de MQL, velocidad de corte efectiva y avance por diente.

Las probetas diseñadas en CAD se mecanizan en un centro EMCO CNC de mecanizado para, posteriormente, medir la rugosidad en la superficie con un rugosímetro MITUTOYO SJ210. Con los datos obtenidos se realiza un estudio en base al método estadístico ANOVA que permite encontrar un intervalo de confiabilidad de los ensayos, lo cual permite validar este trabajo; además se determina que para este estudio la mejor calidad superficial se logra usando en el sistema MQL aceite vegetal con 50 [ml/h], velocidad de corte 220 [m/min] y avance por diente de 0,05 [mm/z].

**Palabras claves:** acero AISI 4140, sistema MQL, parámetros de corte, rugosidad superficial.

## ABSTRACT

The present work studies the surface quality obtained in machining milling - 3D finishing of AISI 4140 steel, using synthetic and vegetable oil with a minimum amount of MQL lubrication system, with variations of 25 [ml/h] and 50 [ml/h] for machining on sloped surfaces, surface quality is analyzed by the use of roughness when measuring roughness. In the tests, cutting factors such as cutting speed ( $V_c$ ) and feed per tooth ( $f_z$ ) are also varied according to the manufacturer's recommendations of the tool used for finishing, the spindle speed is kept constant at 6000 [rpm] and the cutting depth at 0.2 [mm]. The specimen for machining contains three earrings of 57, 63 and 70° designed in CAD, thus varying the effective cutting speed at the tip of the round cutter tool of diameter 14 [mm] with titanium nitride coating and titanium aluminum nitride, called FIREX.

The methodology used is that proposed by Genichi Taguchi, a statistical methodology based on orthogonal arrangements that simplify the number of tests, in this case 27 experiments have been carried out, combining MQL factors, effective cutting speed and feed per tooth. CAD-designed specimens are machined in an EMCO CNC machining center to then measure surface roughness with an MITUTOYO SJ210 roughometer.

With the results obtained an analysis is performed based on the statistical method ANOVA that allows to find a reliability interval of the tests, which allows to validate this work, it is also determined that for this study the best surface quality is achieved using in the MQL system vegetable oil with 50 [ml/h], cutting speed 220 [m/min] and feed per tooth of 0.05 [mm/z].

**Keywords:** AISI 4140 steel, MQL system, cutting parameters, surface roughness.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el uso de lubricantes como un medio de refrigeración en procesos de mecanizado es muy común, pero ciertos lubricantes de origen sintético son perjudiciales para la salud puesto que son elaborados de forma artificial y representan un gran riesgo para el operario y el medio ambiente. Jayal et al. [1] menciona que es necesario lograr una sostenibilidad en actividades industriales. Es necesario la implementación de nuevas tecnologías y optimizar la planificación de procesos para reducir el consumo de recursos y desechos tóxicos, así como los riesgos laborales.

Hadad & Sadeghi. [2] manifiestan que la aplicación de la técnica MQL mejora el rendimiento del corte prolongando el período de utilidad de la herramienta y mejora la calidad en las piezas mecanizadas. El rango de flujo del sistema MQL es de entre 50 - 500 [ml/h], lo que demuestra que es 10.000 veces menor el flujo en relación con los sistemas convencionales tal como expone Chetan et al. [3].

Los lubricantes de origen vegetal se presentan como una alternativa al uso de lubricantes sintéticos, Araújo et al. [4] exponen los valores de punto de inflamación en lubricantes vegetales en ciertos casos son altos en relación con los sintéticos. Las propiedades superiores de los lubricantes vegetales son atribuidas a su estructura molecular y química. Estos lubricantes se unen más fácilmente a la superficie metálica. El proceso de fresado debe de ser optimizado, para ello se aplica un análisis mediante el método de Taguchi, Muaz & Choudhury, [5] lo usan para obtener los parámetros óptimos con los cuales trabajar y obtener mejores resultados.

# **CAPÍTULO I**

## **GENERALIDADES**

El presente capítulo describe el acero AISI 4140, sus características físicas y químicas, así como también su composición, nomenclatura y aplicaciones generales del mismo. De la misma manera, este capítulo abarca el desarrollo de los conceptos como el sistema de mínima cantidad de lubricación abreviado como MQL por sus siglas en inglés, el fresado CNC 3D y sus diferentes estrategias en la industria metalmecánica, los diferentes parámetros de operación como avance por diente ( $fz$ ), velocidad de corte ( $Vc$ ), profundidad, herramienta de corte fresa de punta esférica GUHRING y el equipo CNC, el uso del aceite sintético y aceite vegetal como fluidos de corte importantes para mantener las superficies de trabajo refrigeradas, la rugosidad o calidad superficial, además, se explicará la metodología indispensable como lo es Taguchi y ANOVA para el desarrollo con éxito de este estudio.

### **1.1.Sistema de Mínima Cantidad de Lubricación**

Un sistema de lubricación por cantidad mínima tiene como función suministrar lubricante al punto activo entre la pieza de trabajo y la herramienta en operaciones de mecanizado. La lubricación se lleva a cabo por medio de un aerosol formado por pequeñas gotas de aceite, finamente, dispersas en una corriente de aire. La herramienta o pieza de trabajo puede recibir la lubricación por cantidades mínimas (minimum quantity lubrication, MQL) [6].

La lubricación por cantidades mínimas puede ser interna, en la cual el lubricante fluye a través de orificios a modo de canales incorporados en la propia herramienta, o externa, utilizando boquillas que se instalan en la máquina orientadas hacia la herramienta [7].

Para la lubricación interna de los sistemas de un canal, el aerosol se produce en el depósito del equipo MQL, a partir del lubricante y aire comprimido, para ser transportado por un único conducto hasta la herramienta a través del husillo y el portaherramientas. En cambio, en los sistemas de dos canales, el aceite y el aire se transportan de forma independiente hasta la herramienta, donde se produce la mezcla

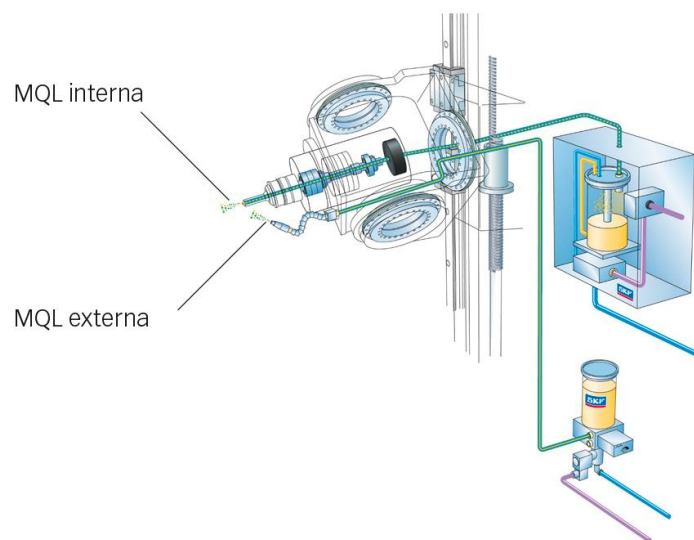


dando lugar al aerosol. Los sistemas de un canal son más eficaces, debido a que trabajan con mayores presiones [7].

Por otra parte, en la lubricación externa el sistema MQL consiste en un depósito de lubricante, una o varias unidades de regulación de mezcla y conductos con boquillas de rociado. El aire comprimido con el que se alimenta el sistema presuriza el depósito de lubricante, como consecuencia de lo cual el lubricante es transportado a través de un sistema de conductos hasta las boquillas de rociado. La regulación de las cantidades requeridas de lubricante y aire, así como el ajuste de la presión interna del depósito de lubricante se realizan por medio de válvulas de control situadas, normalmente, en dicho depósito [8].

La tecnología y aplicación del sistema de mínima cantidad de lubricación se desarrollan rápidamente, permitiendo que su aplicación sea aprovechada en gran medida.

En el presente proyecto técnico se usará la lubricación de manera externa como se observa en la Figura 1. Esto permite que el contacto del lubricante sea de manera directa entre el material a mecanizar y la herramienta a utilizar. Esto permitirá controlar el porcentaje de aspersion del lubricante, dando paso a ser utilizado como una variable a controlar en las pruebas de acabado del acero AISI 4140 para el análisis comparativo entre el aceite vegetal y sintético.



**Figura 1.** Sistema de cantidad mínima de lubricación externa e interna [9].

## 1.2. Fluidos de corte

### 1.2.1. Aceite vegetal

Es un lubricante puro de base vegetal que puede ser usado en varias operaciones de corte de metal, para lograr productividad efectiva de mecanizado en metales ferrosos y no ferrosos. Estable en calor y de presión extrema para mejorar el acabado en la superficie de la pieza de trabajo. Empaña muy poco, para prevenir niebla en el taller [10].

El lubricante seleccionado para las pruebas es el aceite de oliva, según lo indica el informe realizado por la Empresa CHEM-SUPPLY PTY LTD [11], puesto que sus propiedades como punto de fusión, punto de ebullición, viscosidad y gravedad específica son similares a los fluidos de corte industriales en base vegetal como los desarrollados por las Empresas Renewable Lubricants [12] y Accu-Lube Manufacturing GmbH [13], es de fácil adquisición y tiene un costo bajo con relación de los fluidos de corte desarrollados por las empresas antes mencionadas.

Es clasificado como no peligroso de acuerdo con el Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y etiquetado de productos químicos (GHS) incluyendo el trabajo, la salud y las regulaciones de seguridad australiana. No es clasificado como mercancía peligrosa de acuerdo con el Código Australiano de Mercancías Peligrosas (ADG) [14]. Esto demuestra que es seguro para su uso por medio del estudio previo, la información de las propiedades físicas y químicas puede ser observada en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Propiedades físicas y químicas del aceite de oliva de origen vegetal [14].

| <b>Designación</b>          | <b>Descripción</b>                           |
|-----------------------------|--|
| Aspecto                     | Líquido viscoso amarillo o amarillo verdoso. |
| Punto de fusión             | -6.0 °C                                      |
| Punto de ebullición         | 300 °C                                       |
| Solubilidad en el agua      | Insoluble.                                   |
| Solubilidad en disolventes  | Soluble en metanol, alcohol, n-octanol;      |
| Gravedad específica         | 0.9150-0.9180 (@ 15.5 °C)                    |
| Presión de vapor            | <0.01mm Hg at 200 °C                         |
| Viscosidad                  | 84 cP at 20 °C                               |
| Punto de inflamación        | 225 °C                                       |
| Inflamabilidad              | Líquido combustible.                         |
| Temperatura autoinflamación | 343 °C                                       |
| Explosión                   | No explosivo.                                |
| Punto de nube               | -6.6 to -1.1 °C                              |

### 1.2.2. Aceite sintético

Es un lubricante que contiene compuestos químicos fabricados artificialmente (sintetizados). Los lubricantes sintéticos pueden fabricarse usando componentes de hidrocarburos modificados, químicamente, antes que petróleo crudo, aunque también pueden sintetizarse a partir de otras materias primas [15].

El aceite sintético seleccionado para las pruebas es el fluido de corte Multi – WFC por sus aplicaciones en el corte de acero de gran dureza tal como lo detalla Würth [16].

Es un fluido de corte sintético multiuso que ofrece excelente refrigeración y lubricación para maquinaria pesada y corte de aleaciones y aceros de gran dureza donde existe la necesidad de un acabado óptimo. Su uso desde el inicio de la operación prolonga la vida útil de la herramienta, facilitando la acción de corte y aumentando la productividad [17].

Existen ciertos datos técnicos de gran importancia acerca de este aceite por ello es necesario visualizarlos en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Datos técnicos fluido de corte Multi – WFC [17].

| <b>Designación</b> | <b>Tipo</b>            |
|--------------------|------------------------|
| Aspecto            | Líquido                |
| Color              | Amarillo claro         |
| Densidad           | 0,90 g/cm <sup>3</sup> |
| Viscosidad a 40°C  | 4 cSt                  |
| Punto de ignición  | >65°C                  |
| Solubilidad        | Insoluble en agua      |

### 1.3. Operaciones de fresado CNC

Los equipos de fresado CNC son instrumentos utilizados en mayor parte para el mecanizado. Las fresadoras CNC funcionan por el desprendimiento de material o viruta, a partir de la acción rotatoria de una herramienta con varios labios o filos cortantes, misma a la que se le conoce como fresa; un ejemplo de este tipo de equipos o máquinas se observa en la Figura 2; también realizan diferentes tipos de fresado en superficies distintas [18].



**Figura 2.** Máquina fresadora CNC [19].

Groover [20], manifiesta que el fresado es parte de un proceso de manufactura, el cual conlleva el arranque de viruta al hacer girar una herramienta de forma cilíndrica de varios filos cortantes en sentido perpendicular al avance de la pieza a mecanizar.

Los principales trabajos en fresado CNC se describen como:

- Fresado de periferia, conocido como fresado plano, en este tipo de fresado la herramienta y la superficie que se está mecanizando son paralelas entre sí.
- Mecanizado de ranuras, también llamado ranurado. La anchura de herramienta en relación con el elemento a mecanizar es menor. Esto permite crear una ranura al momento del trabajo.
- Fresado de lateralidad, la herramienta mecaniza las superficies laterales del elemento de trabajo,
- El fresado de formas es clasificado como operación de conformado.



**Figura 3.** Operaciones de fresado [21].

### **1.3.1. Mecanizado de alta velocidad**

Nicolalde & Tutillo. [22] manifestaron que el mecanizado de alta velocidad se caracteriza porque la sección de viruta se mantiene, así como el avance por diente y las condiciones de inmersión (profundidad de pasada) se reducen en una gran medida; por ende, se produce una elevación en la velocidad de corte sobre la normal. Al valorizar el concepto de Mecanizado de Alta Velocidad, se puede concluir que, actualmente, se pueden realizar operaciones de fresado acabado a alta velocidad, permitiendo obtener una mejor calidad superficial [22].

### **1.4. Parámetros de corte para operaciones de fresado**

En las operaciones de fresado existen ciertos parámetros principales de corte como el avance por diente y la velocidad de corte. También es necesario el cálculo de ciertos valores como la profundidad de corte y la selección del tipo de herramienta adecuada para el proceso de mecanizado.

#### **1.4.1. Velocidad de corte (Vc)**

Indica la rapidez superficial en el diámetro efectivo. Este valor es necesario para determinar los datos de corte reales en la profundidad de corte efectiva [23]. Para el cálculo de la velocidad de corte efectiva se utiliza el diámetro efectivo de la herramienta.

Las variables pueden ser observadas en la Ecuación 1.

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

Se deduce que:

$V_c$ : Velocidad de corte [m/min]

$D$ : Diámetro de la fresa [mm]

$N$ : Revoluciones del cabezal [rpm]

#### **1.4.2. Avance por diente (fz)**

Se lo conoce como avance lineal, ayuda a conocer la cantidad de viruta que puede admitir cada diente en la fresa, denominándolo avance por diente a la trayectoria que

recorre el diente al impactar con el material de trabajo. Esto se observa en la Figura 4. El avance puede calcularse utilizando la fórmula de Ecuación 2 [24].

$$f_z = \frac{V_f}{z \times n} \quad (2)$$

Donde:

$f_z$  : Avance por diente [mm/ diente]

$V_f$ : Velocidad de avance [mm/min].

$z$ : Número de dientes.

$n$ : Velocidad de giro de la fresa [rpm].

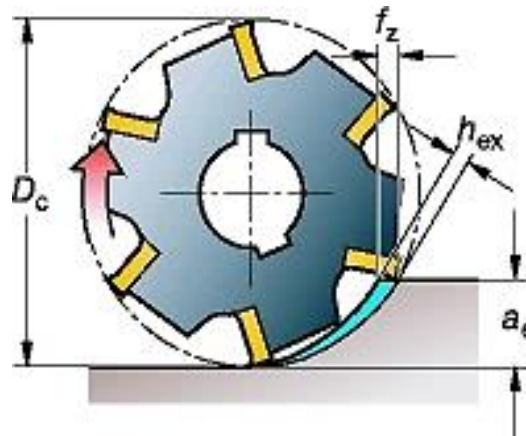


Figura 4. Avance por filo por fresado periférico [25].

#### 1.4.3. Profundidad de corte ( $a_p$ )

Se define como la diferencia del radio del agujero no mecanizado con la superficie mecanizada en dirección axial. La profundidad máxima está limitada principalmente por el tamaño de la plaquita y la potencia de la máquina [23].

#### 1.4.4. Velocidad de avance ( $V_f$ )

Es definida como la velocidad con que la herramienta inicia el desbaste del material. Su fórmula se detalla en la ecuación 3, velocidad de avance [26].

$$V_f = f_z \times z \times n \quad (3)$$

#### 1.4.5. Diámetro efectivo ( $D_{eff}$ )

Es el diámetro mayor de la herramienta que está en contacto con la herramienta en el momento del corte [27]. Para el cálculo en fresas esféricas la fórmula se observa en la Ecuación 4.

$$D_{eff} = D \times \text{sen} \left[ \alpha - \arccos \left( \frac{D - 2a}{D} \right) \right] \quad (4)$$

Donde:

$D_{eff}$ : Diámetro efectivo.

$D$ : Diámetro de la herramienta [mm].

$a_p$ : Profundidad de corte [mm].

$\alpha$ : Pendiente de la superficie [°].

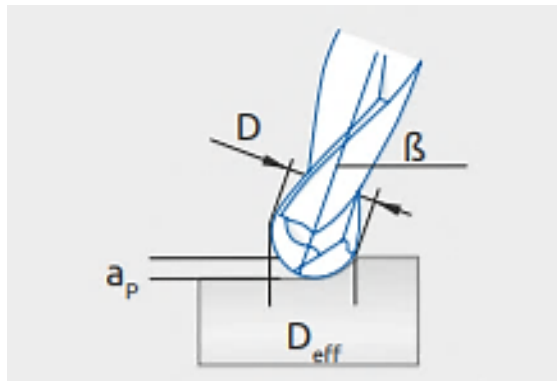


Figura 5. Diámetro efectivo en corte de fresas esféricas [26].

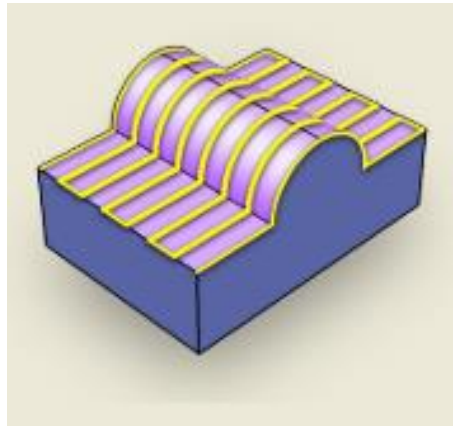
### 1.5. Estrategias de mecanizado

Son un conjunto de trayectorias que pueden ser usadas en el proceso de mecanizado, pero dependen directamente del software CAM en el cual se haya elaborado el modelo 3D del elemento a mecanizar. Entre las principales estrategias de mecanizado se encuentran:

#### 1.5.1. Acabado en paralelo

Es más adecuado para modelos rectangulares. Funciona con un patrón de curvas, dentro del límite y proyectando puntos de estas curvas en el modelo. Las trayectorias paralelas se aplican con frecuencia a piezas abiertas. Es una estrategia de mecanizado

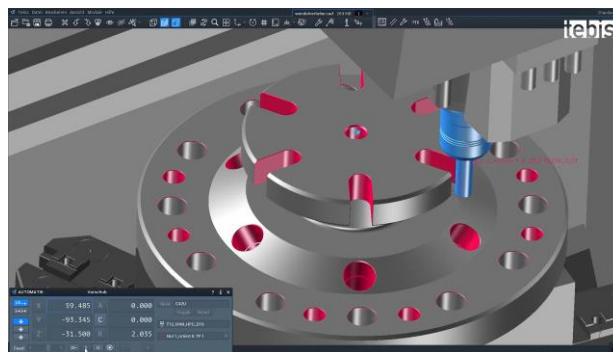
potente que funciona en muchos modelos, pero no en aquellos con zonas verticales [28].



**Figura 6.** Acabado en paralelo [28].

### 1.5.2. Contorno

Mecaniza en función de la constante Z, se pueden fresar de forma óptima los perfiles de altura 3D con la estrategia de variación Z. En el mecanizado en descenso se puede eliminar rápidamente mucho material con herramientas especiales, por lo general es usado para el desbaste de material con una gran profundidad de corte [29].

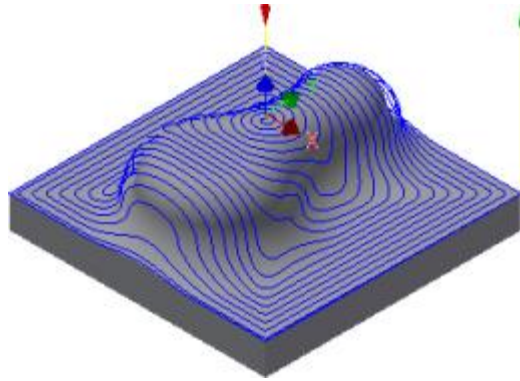


**Figura 7.** Mecanizado de contorno [29].

### 1.5.3. Espiral 3D

Es la más indicada para el mecanizado de áreas con un paso lateral constante y funciona bien en superficies casi horizontales. Crea una serie de desfases desde el límite exterior hasta el centro. Las trayectorias de espiral fresan figuras con desfases progresivos que avanzan hacia el centro de la figura con patrón inicial, mismos que se obtienen con el límite del bloque, el límite de la figura o la curva indicada en la pestaña de Bloque [28].

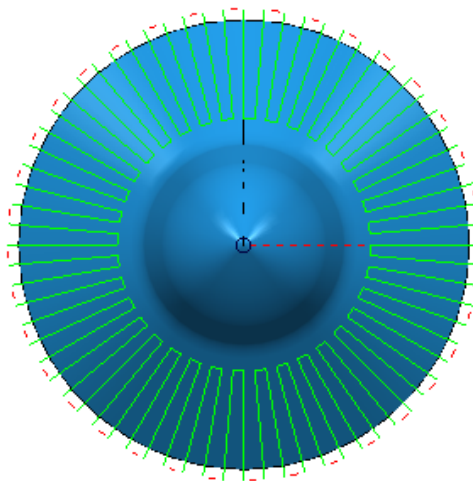




**Figura 8.** Mecanizado en espiral 3D [30].

#### 1.5.4. Radial

Crea un patrón radial dentro de un límite y lo proyecta en el modelo, pero no todos los diseños son compatibles con este tipo de estrategia ya que depende en gran medida de la forma del modelo, por lo que no es la mejor estrategia para modelos o figuras con grandes alargamientos o muy delgadas, lo que se puede decir que no todos los modelos son compatibles con patrones de forma radial [28].

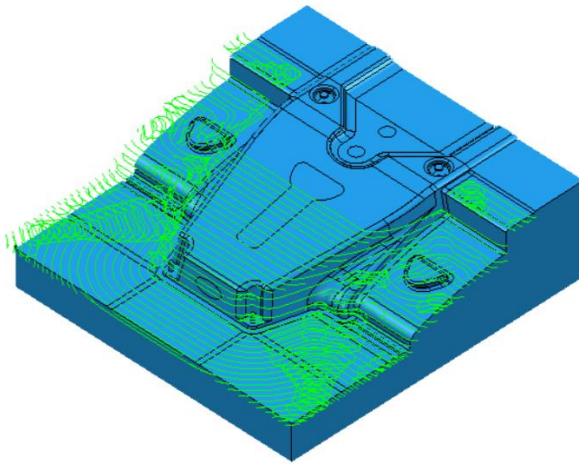


**Figura 9.** Estrategia de mecanizado radial [31].

#### 1.5.5. Trayectorias vortex de 3D

Es una estrategia de desbaste que elimina rápidamente el material de una pieza de 3D controlando la carga de herramienta. La estrategia Vortex es la más indicada para las herramientas de carburo sólido y se combina frecuentemente con pasadas intermedias, el ángulo de inserción nunca excede, más del 15%, al producido por un corte en línea recta con un paso lateral dado. De esta forma se elimina la carga excesiva de la

herramienta y los cortes con toda la herramienta. Hace posible el aumento de las velocidades de avance [32].



**Figura 10.** Estrategia trayectoria Vortex 3D [32].

### **1.6. Acero AISI 4140**

El acero aleado AISI 4140 es un acero de baja aleación que contiene cromo, molibdeno y manganeso. Tiene alta resistencia a la fatiga, resistencia a la abrasión y al impacto, tenacidad y resistencia a la torsión [33].

Es usado, generalmente, para construcción de maquinaria, que posee una alta resistencia, especialmente, en medidas pequeñas y medianas. El tratamiento térmico de fabricación es templado y revenido (temple tenaz bonificado), por lo que no se requeriría un tratamiento térmico posterior, a no ser que así lo exija la aplicación y en ese caso, se templearía en aceite para obtener propiedades mecánicas más elevadas [34].

También se conoce como Acero de grado maquinaria al Cromo-Molibdeno con dureza aproximada de 28-34 HRC, buena resistencia a la tensión, torsión y a la flexión para piezas y partes de maquinaria de uso general [35].

#### **1.6.1. Propiedades del acero AISI 4140**

En las Tablas 3 y 4 se detallan las propiedades del acero AISI 4140, así como las equivalencias en otras normas usadas en la industria mecánica, también el porcentaje con que cada elemento químico lo conforma.

Además, se especifican las propiedades físicas y mecánicas; entre ellas la dureza, la elasticidad, resistencia a la tracción, entre otros.

**Tabla 3.** Propiedades químicas del acero bonificado AISI 4140 [36].

| <b>Elemento</b> | <b>Valor %</b> | <b>Código de Color</b> | <b>Equivalencia</b>         |
|-----------------|----------------|------------------------|-----------------------------|
| C               | 0,38- 0,43     |                        | <b>AISI / SAE</b><br>(4140) |
| Si              | 0,15 – 0,35    |                        |                             |
| Mg              | 0,75 – 1,00    |                        | <b>W. Nr</b> (1.7225)       |
| P               | 0,030          | Dorado / Verde         | <b>Din</b> (42 CrMo4)       |
| S               | 0,040          |                        |                             |
| Cr              | 0,80 – 1,10    |                        | <b>JIS</b> (SCM4)           |
| Mo              | 0,15 – 0,25    |                        | <b>AFNOR</b> (42CD4)        |

**Tabla 4.** Propiedades físicas y mecánicas del acero AISI 4140 [33] , [36].

| <b>Propiedad</b>                | <b>Valor</b>                |
|---------------------------------|-----------------------------|
| Esfuerzo de tracción            | 90 – 105 kg/mm <sup>2</sup> |
| Esfuerzo de cedencia            | 70 kg/mm <sup>2</sup>       |
| Elongación                      | Min 12 %                    |
| Reducción en área               | Min 50 %                    |
| Resistencia al impacto          | aprox. 25 J                 |
| Dureza                          | 275 – 320 HB                |
| Módulo o resistencia al corte   | 80 GPa                      |
| Coefficiente de Poisson         | 0.27-0.30                   |
| Elasticidad límite              | 415 MPa                     |
| Alargamiento a la rotura (50mm) | 25,70%                      |
| Módulo de elasticidad           | 190-210 GPa                 |

### 1.6.2. Características del acero AISI 4140

Este tipo de acero se caracteriza por ciertos elementos propios, esto puede ser observado con una descripción general en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Características AISI 4140 [37]

| <b>Tipo</b>         | <b>Descripción</b>  |
|---------------------|---|
| Resistencia         | Por su alta resistencia a la tracción, compresión y torsión, es usado para fabricar piezas móviles.   |
| Maquinado           | Este acero se comporta muy bien en el acabado superficial y debido al % de Cr que posee, su resistencia a la corrosión es notoriamente mayor.                                       |
| Soldadura           | No recomendable para producir piezas mediante aporte de soldadura, las zonas cercanas a los cordones de unión tienden a templarse por lo tanto aumenta la fragilidad.               |
| Ductilidad          | Buenos resultados con piezas estampadas y embutidas, solo realizando estos procesos en caliente. Recomendable en piezas forjadas y aconsejable en elaboración de herramientas.      |
| Tratamiento Térmico | Gran templabilidad tanto en capas superficiales como en el núcleo. Para obtener mayor dureza deben ser cementados y templados al aceite. Recomendado para piezas de tamaño mediano. |

### **1.7. Herramienta**

En las operaciones de fresado, uno de los requisitos principales es que las piezas de trabajo tengan cada vez mejores superficies. Las fresas de acabado poseen geometrías especiales que satisfacen este requisito [38].

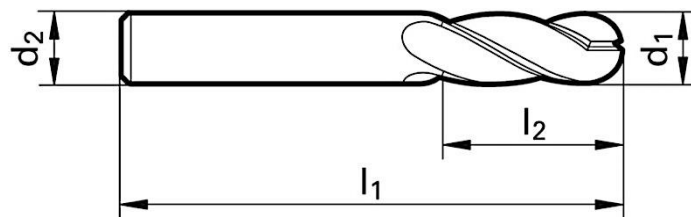
SANDVIK [39] en su catálogo expone que el usar una fresa de punta esférica con menor profundidad, es posible incrementar la velocidad de corte y acorta el tiempo en que el filo de la herramienta está en contacto con el material; por ende, el tiempo para la propagación de calor en la zona de corte se reduce; es decir, la temperatura del filo de la herramienta y la del material en contacto se mantienen bajas.

De acuerdo con lo antes expuesto, se ha seleccionado una fresa de punta esférica para la operación de acabado del material AISI 4140, fabricada por GUHRING y de revestimiento multicapa FIREX. Este revestimiento proporciona dureza (TiN) y resistencia al calor (TiAlN), las especificaciones de esta herramienta pueden ser observadas en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Especificaciones de fresa punta esférica GUHRING [40].

| Tipo               | Designación             |
|--------------------|-------------------------|
| Número de serie    | 3727                    |
| Revestimiento      | FIREX (TiN-TiAlN)       |
| Dirección de corte | Mano derecha            |
| Ángulo de hélice   | 30°                     |
| Tipo               | Nariz de bola universal |
| Tolerancia         | h10                     |
| Material           | Carburo                 |
| Flautas            | 4                       |
| Tipo de caña       | HA cilíndrico           |

La siguiente Figura muestra la geometría de la herramienta, misma que es complementada en la Tabla 7 con los datos proporcionados por el fabricante.



**Figura 11.** Fresa de acabado punta esférica. [40].

**Tabla 7.** Medidas de fresa punta esférica GUHRING [40]

| Designación                | Longitud [mm] |
|----------------------------|---------------|
| Diámetro $d_1$             | 14            |
| Diámetro del vástago $d_2$ | 14            |
| Longitud total $l_1$       | 83            |
| Longitud de flauta $l_2$   | 26            |

Para la selección de los parámetros de corte, el fabricante proporciona los valores permisibles para la herramienta, según el material a utilizar en el mecanizado, tal como se indica en la Figura 12, en la cual se ha marcado con un recuadro en color rojo para distinguir los parámetros para el acero AISI 4140, también conocido como 1.7225 42CrMo4.

| Material  | Hardness                    | Type of application | cut Vc | fz (mm/z) with nom. Ø |       |       |       |
|---|-----------------------------|---------------------|--------|-----------------------|-------|-------|-------|
|   |                             |                     |        | 12                    | 16    | 20    | 25    |
| Structural + free-cutting steels, unalloyed heat-treatable + case hardened steels<br>1.0035 S185, 1.0486 P275N, 1.0345 P235GH, 1.0050, 1.0070, 1.8937<br>1.0718 11SMnPb30, 1.0736 11SMn37<br>1.0402 C22, 1.1178 C30E<br>1.0503 C45, 1.1191 C30E<br>1.0301 C10, 1.1121 C10E<br>1.1750 C75W, 1.2076 102Cr6, 1.2307 29CrMoV9                 | up to 850 N/mm <sup>2</sup> | Slotting            | 120    | 0.050                 | 0.070 | 0.080 | 0.110 |
|   |                             | Roughing            | 140    | 0.058                 | 0.080 | 0.100 | 0.120 |
|   |                             | Finishing           | 240    | 0.055                 | 0.070 | 0.090 | 0.120 |
| Free-cutting steels, unalloyed case hardened steels, nitriding steels<br>1.0727 46 S20, 1.0728 60 S20, 1.0757 46SPb20<br>1.0601 C60, 1.1221 C60E<br>1.7043 38Cr4<br>1.5752 15NiCr13, 1.7131 16MnCr5, 1.7264 20CrMo5<br>1.8504 34CrAl6<br>1.8519 31CrMoV9, 1.8550 34CrAlNi7  | 850-1.200 N/mm <sup>2</sup> | Slotting            | 110    | 0.050                 | 0.070 | 0.080 | 0.110 |
|   |                             | Roughing            | 130    | 0.058                 | 0.080 | 0.100 | 0.120 |
|   |                             | Finishing           | 220    | 0.055                 | 0.070 | 0.090 | 0.120 |
| Alloyed heat-treatable, tool and high speed steels<br>1.5131 50MnSi4, 1.7003 38Cr2, 1.7030 28Cr4<br>1.5710 36NiCr6, 1.7035 41Cr4, 1.7225 42CrMo4<br>1.2080 X210Cr12, 1.2083 X42Cr13, 1.2419 105WCr6, 1.2379 X155CrVmo12-1<br>1.3243 S 6-5-2-5, 1.3343 S 6-5-2, 1.3344 S 6-5-3<br>Spring steel = 1.5026 55Si7, 1.7176 55Cr3, 1.8159 51CrV4 | 850-1.400 N/mm <sup>2</sup> | Slotting            | 130    | 0.047                 | 0.060 | 0.080 | 0.100 |
|   |                             | Roughing            | 180    | 0.054                 | 0.070 | 0.090 | 0.110 |
|   |                             | Finishing           | 220    | 0.051                 | 0.070 | 0.090 | 0.110 |

Figura 12. Parámetros de corte de fresa punta esférica [41].

## 1.8. Calidad o rugosidad superficial

Las superficies mecanizadas, en especial, las realizadas por operaciones de fresado son usadas con el propósito de acoplarse a otras para cumplir con ciertas funciones o accionar mecanismos, la calidad o rugosidad superficial es de suma importancia en esto, ya que influye en gran medida en la eficiencia de operaciones de trabajo y el costo del mecanizado [42].

En la toma de medidas, en la rugosidad de superficie, se utiliza un instrumento denominado rugosímetro. Este puede realizar un registro de la rugosidad de la superficie. Este equipo consta de una punta de diamante, la cual recorre en línea recta y perpendicular a la superficie a medir, por lo general avanza de 0,08 [mm] a 25 [mm], según la longitud de la aguja y cabeza del equipo, así como los requerimientos [43]. El siguiente gráfico representa cómo se realiza la toma de medición de la rugosidad superficial.

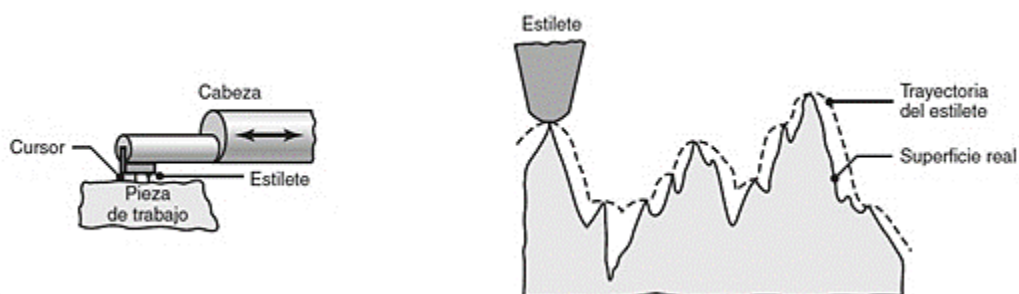
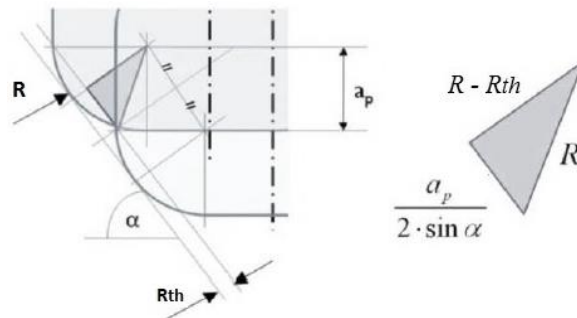


Figura 13. Medición de la rugosidad de superficie [44].

En las operaciones de mecanizado, la calidad superficial se origina por el paso de la herramienta. Esta produce ciertas irregularidades en la superficie a lo que se le conoce como surcos y crestas. El radio de la fresa determina cuál será la altura de la cresta a la que se le denomina como  $R_{th}$ , también influyen el ángulo de pared ( $\alpha$ ) así como la profundidad del corte ( $a_p$ ). A manera de representación gráfica se puede observar las variables influyentes en la Figura 14 [44].



**Figura 14.** Descripción de las variables en la medición de la rugosidad superficial [45].

Al calcular la rugosidad se establece la ecuación 5, la cual se muestra a continuación [45].

$$R_{th} = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{a_p}{2 \cdot \sin \alpha}\right)^2} \quad (5)$$

De lo cual:

$R$ : Radio de fresa punta esférica [mm].

$\alpha$ : Ángulo de la pared [°].

### 1.8.1. Rugosidad media aritmética ( $R_a$ )

Su unidad es la micra ( $\mu\text{m}$ ) y se define como el promedio aritmético de los valores absolutos de las distancias de rugosidad a la línea intermedia de la longitud de medición, basándose en la normativa ISO 4287/ 1DIN 4768 [46].

En el análisis de los datos obtenidos de cada una de las mediciones, se procede al cálculo de la media aritmética de los valores de las desviaciones. Para el cálculo y análisis se muestra la Ecuación 6 [47].

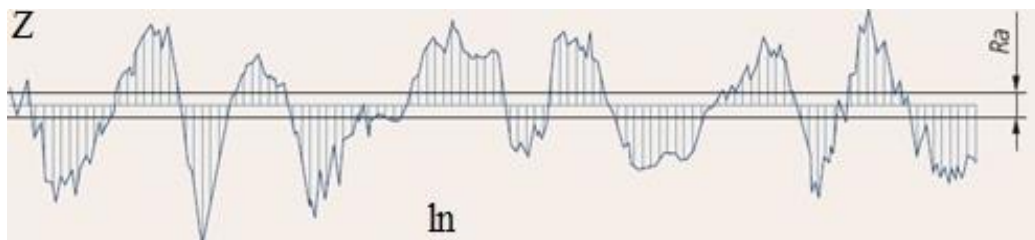
$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i| \quad (6)$$

Donde:

$Z_i$ : Representa las desviaciones del perfil en Z.

Para la presente investigación se utiliza esta rugosidad debido a que este parámetro lo incorporan, casi en su totalidad, los instrumentos de medida de rugosidad actuales.

En la Figura 15 se puede observar cómo el equipo de medición percibe la rugosidad media aritmética y lo representa a manera de gráfica, donde Ra es la altura del rectángulo que establece un promedio de las mediciones tomadas por el equipo.



**Figura 15.** Valor de media aritmética [47].

### 1.8.2. Rugosidad de la raíz media cuadrática ( $R_q$ )

Se define como la raíz cuadrada entre la media de los cuadrados de las desviaciones  $Z_i$  con inicio en la línea media del perfil de evaluación. En la Ecuación 7 se observa la fórmula designada para el cálculo de la media cuadrática [47].

$$Rq = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

### 1.8.3. Profundidad media de rugosidad ( $R_z$ )

Para que sea obtenido este valor es necesario cinco mediciones de las longitudes de muestreo que están dentro de la longitud de evaluación. En la Ecuación 8 se detalla los parámetros para este cálculo. [47].

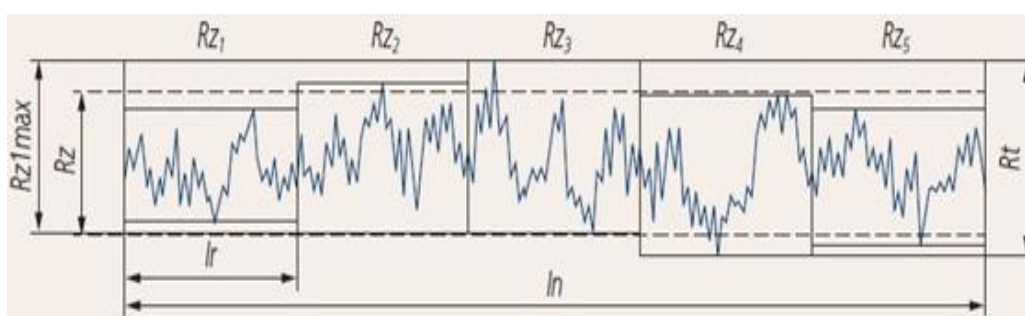


$$R_z = \frac{R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5}}{5} \quad (8)$$

Donde:

$R_{z1-5}$ : Altura media en la longitud de muestreo.

En la siguiente Figura se puede observar cómo se realiza el cálculo en cada intervalo, desde el pico más alto a la parte más profunda en toda la longitud de medición.



**Figura 16.** Representación de la profundidad media de rugosidad [47].

### 1.9. Equipo de medición

Para medir la calidad o rugosidad de superficie se ha seleccionado un equipo de la marca Mitutoyo, en la Tabla 8 se detalla las especificaciones técnicas dadas por el fabricante de esta herramienta.

**Tabla 8.** Especificaciones del rugosímetro MITUTOYO SJ210 [47].

| Elemento                             | Designación   |
|--------------------------------------|---|
| Pantalla                             | Digital   |
| Rango de medición en X               | 17,5 mm   |
| Rango de medición en Z               | 360 $\mu\text{m}$ (-200 $\mu\text{m}$ $\pm$ 160 $\mu\text{m}$ ) |
| Velocidad de seguimiento en medición | (0,25 - 0,5 - 0,75) mm/s  |
| Radio de la punta aguja              | 5 $\mu\text{m}$   |
| Rango mínimo / resolución            | (25 $\mu\text{m}$ / 0,002 $\mu\text{m}$ )                       |

La Figura 17 muestra el equipo de medición como tal.



**Figura 17.** Rugosímetro MITUTOYO SJ210 [47]

### 1.10. Metodología Taguchi

Esta metodología define a cada factor su nivel correspondiente. El proceso de mecanizado es un ejemplo de esto, en él influyen varios factores de dependencia. El uso de este método muestra resultados de gran evidencia con el estudio de la influencia física y el proceso realizado [44].

Ciertos investigadores entre ellos Wang et al [42] así como Zhang et al [48], en sus investigaciones usan el método Taguchi como herramienta para la predicción y optimización del acabado en operaciones de fresado frontal, siendo de gran éxito la verificación de los resultados para el perfeccionamiento de las variables en el fresado de rugosidades superficiales.

Al usar el método Taguchi como modelo de predicción, es necesario determinar una matriz ortogonal misma que favorece al experimento. Esta plantea determinados números de grados de libertad en el arreglo ortogonal (AO), mismo que es un número mayor que el total de ensayos necesarios del experimento. En la siguiente Ecuación se explica cómo obtener estos grados [49].

$$DF = ((n1-1) \cdot (nf)) + ((n1-1) \cdot (n1-1) \cdot ni) \quad (9)$$

Se define que:

*DF*: Son los grados de libertad.

*nI*: Es el número de niveles.

*nf*: Es el número de factores.

*ni*: Son los números de iteraciones.

### **1.10.1. Arreglo ortogonal (AO)**

Es una combinación de los niveles y los números de los factores para ser observados durante la experimentación. Tomando como base el caso de tres factores, es necesario tres interacciones: AxB, BxC y AxC. Cada iteración depende directamente de cada factor a experimentar [50].

Geniche Taguchi desarrolló una fórmula en la que establece la serie de arreglos particulares. Esta puede observarse en la Ecuación 10:

$$La = (b)^c \quad (10)$$

De lo cual:

*La*: Es la cantidad de pruebas o experimentos necesarios.

*b*: Son los niveles que toma cada factor.

*c*: Representa la cantidad de factores.

### **1.11. Análisis de varianza ANOVA**

Permite la toma de decisiones de forma objetiva con bases estadísticas. Esto ayuda a la detección de cualquier diferencia del rendimiento de los elementos probados en sus promedios. También prueba de manera formal la importancia de cada factor principal con sus iteraciones. Se compara el cuadrado medio con la estimación del error experimental de los niveles específicos de confianza [51].

Es necesario el uso de Tabla F de Fisher de distribución para el análisis de varianza ANOVA explicada a continuación.

### 1.11.1. Variables del análisis ANOVA

En la siguiente tabla se encuentra expresado las variables de uso en el estudio de la varianza ANOVA.

**Tabla 9.** Variables del análisis ANOVA [52].

| <b>Símbolo</b> | <b>Designación</b>            | <b>Símbolo</b> | <b>Designación</b>          |
|----------------|-------------------------------|----------------|-----------------------------|
| <i>V</i>       | Promedio de raíces o Varianza | <i>F</i>       | Prueba F.                   |
| <i>S</i>       | Suma de cuadrados.            | <i>P</i>       | Porcentaje de intervención. |
| <b>DF</b>      | Grados de libertad.           | <b>T</b>       | Soluciones totales.         |
| <b>N</b>       | Número de experimentos.       | <b>CF</b>      | Factor de corrección.       |
| <i>E</i>       | Error (experimental).         |                |                             |

### 1.11.2. Varianza

De forma general se puede definir como la sumatoria de las desviaciones al cuadrado con respecto al promedio o a la media, todo esto dividido entre el número total de observaciones menos 1 [53]. En el caso del análisis ANOVA, la varianza es el cálculo de la suma de cuadrados de cada resultado del experimento y dividido para los grados de libertad del factor obtenido [52].

La Ecuación 11 detalla la fórmula de la varianza para el uso del método ANOVA:

$$V = \frac{S}{f} \quad (11)$$

### 1.11.3. Prueba F de Fisher

Expresa el nexo del error y el parámetro de varianza del parámetro, es usado en la verificación de la variable analizada y como interviene en el estudio [52].

Para esta sección se procede a comparar el resultado calculado y el valor de la prueba F de Fisher de la Tabla 25, de lo cual se tiene en cuenta cada uno de los niveles de estadística significancia, en este análisis el nivel es de 5% de significancia. Dado que al calcular el valor es mayor que el tabulado, puede concluirse que el parámetro tiene

significancia estadística en el análisis, caso contrario será agrupado con respecto de la prueba de hipótesis.

Dicho valor F se calcula mediante la ecuación 12.

$$F = \frac{V}{V_e} \quad (12)$$

#### 1.11.4. Porcentaje de influencia P

Representa el nexo de relación entre la suma total de cuadrados y la sumatoria de cuadrados de cada factor. Esto es demostrado de la siguiente forma:

$$P = \frac{S}{S_T} \cdot 100\% \quad (13)$$

Para la adición de cuadrados totales  $S_T$  puede obtenerse del resultado de la sustracción entre el factor de corrección CF y la suma de cuadrados de cada prueba en la Ecuación 14.

$$S_T = S - CF \quad (14)$$

El factor de corrección está descrito en la Ecuación 15, donde la variable (y), es el resultado de cada nivel y factor.

$$CF = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n y_i \right]^2 \quad (15)$$

#### 1.11.5. Prueba de la hipótesis

Examina dos tipos de hipótesis de carácter opuestas de una población, o sea la hipótesis nula y la hipótesis alternativa. La configuración de dichas hipótesis permite verificar lo que se desea corroborar [52].

Para validar se compara cada uno de los resultados de la Tabla 25 de distribución F con el valor F.

#### **1.11.6. Hipótesis nula (H0)**

Afirma que el elemento que fue analizado no posee diferencia alguna significativa, estadísticamente, en el inicio de las combinaciones [52].

#### **1.11.7. Hipótesis alternativa (H1)**

Afirma que el elemento que fue analizado posee alguna diferencia de significancia, estadísticamente, en el inicio de las combinaciones y es una variable que influye en la investigación [52].

## **CAPÍTULO II**

### **GENERALIDADES**

En este capítulo se presenta la metodología de la experimentación, es decir, se diseña los pasos experimentales a seguir para el análisis de la rugosidad superficial, la metodología Taguchi y sus arreglos ortogonales, se seleccionan también los valores de los parámetros de corte, se define además la estrategia de mecanizado. El diseño de las probetas CAD se llevará a cabo a través de un software especializado, posterior a ello se realizarán las respectivas simulaciones CAM en conjunto con toda la programación referente al desarrollo del mecanizado CNC 3D. Finalmente se medirán los datos y se organizarán en tablas para su posterior análisis en el Capítulo III.

#### **2.1. Metodología de la experimentación**

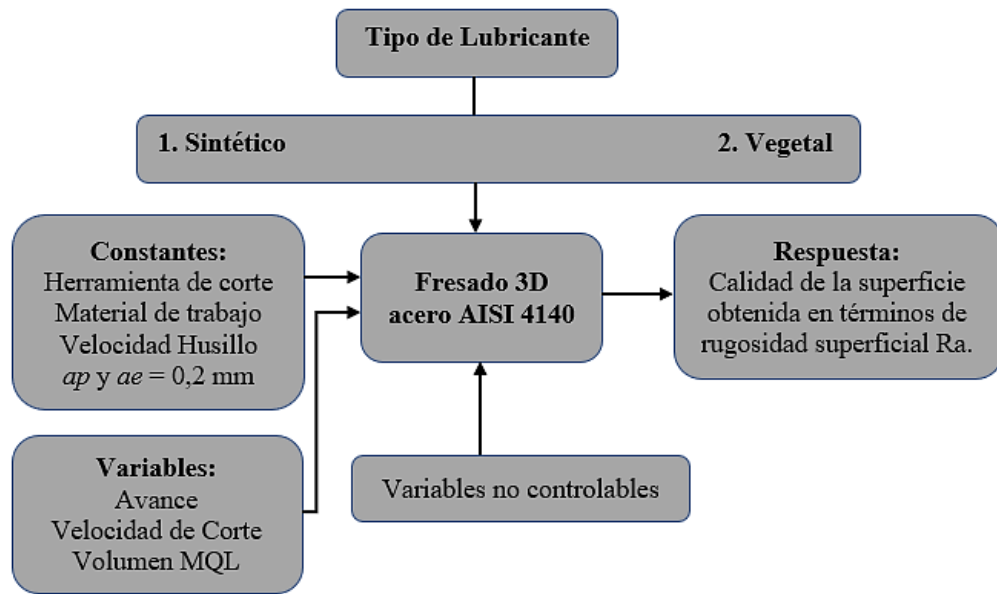
##### **2.2.1. Diseño de la experimentación**

Los factores y variables que influyen directamente en la calidad superficial durante el fresado CNC 3D del acero AISI 4140 son: la herramienta, el sistema de lubricación, el lubricante o refrigerante, los parámetros de corte sean estos: velocidad, profundidad y avance; de la misma manera influye también la estrategia de mecanizado. De esta manera, la adecuada y minuciosa selección de parámetros tanto variables como constantes dependerá el resultado final a obtener.

Los parámetros constantes en este trabajo son: la velocidad del husillo fijada en  $N = 6000$  [rpm], las profundidades de corte axial ( $a_p$ ) y radial ( $a_e$ ) = 0,2 [mm], la herramienta de corte y claramente el material acero AISI 4140.

Para los parámetros de corte variables serán: la velocidad de corte ( $V_c$ ) y el avance por diente, de acuerdo con los valores permitidos por el fabricante de la fresa de acabado redonda cuyo diámetro será 14mm. La experimentación 3D se realizará sobre superficies planas inclinadas con ángulos de inclinación de  $57^\circ$ ,  $63^\circ$  y  $70^\circ$ , lo cual varía la velocidad de corte efectiva obtenida a través del diámetro efectivo de la herramienta.

La Figura 18 muestra a manera de un esquema la formulación experimental planteada para el desarrollo del presente trabajo.



**Figura 18.** Esquema de formulación experimental para evaluar la calidad de la superficie obtenida en términos de rugosidad superficial (Ra), por fresado 3D del acero AISI 4140.

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

Una vez finalizado el mecanizado y posterior medición de resultados, se procede a realizar un análisis estadístico usando la metodología planteada por ANOVA y Taguchi con el fin de determinar cómo influyen los factores en la rugosidad superficial en el mecanizado de acabado 3D y validar además el presente estudio, encontrando para ello un intervalo de confianza.

### 2.3. Parámetros de corte

La velocidad de corte está dada, específicamente, por el fabricante de la herramienta. Esta información se encuentra en la Figura 12 en la cual, el rango se encuentra entre 130 y 220 [m/min]; por lo tanto y para el presente estudio se selecciona tres velocidades de corte permitidas; estas serán de 180, 200 y 220 [m/min].

Para el avance por diente, de la misma manera se consideran tres avances. Estos son los siguientes:  $f_z = 0,05; 0,1$  y  $0,15$  [mm/diente], que corresponden a la velocidad de avance de  $V_f = 1200, 2400$  y  $3600$  [mm/min] respectivamente.

### 2.4. Estrategia de mecanizado

La rugosidad superficial está estrechamente ligada a la estrategia de mecanizado fresado 3D, de esta manera la elección preferida para este ensayo y en base al análisis



de estrategias presentadas en el capítulo anterior, se tomará la estrategia de contorno en descenso (CD). Este parámetro será constante en todos los ensayos.

## 2.5. Definición de niveles y parámetros de fresado

La Tabla 10 indica tres niveles con sus parámetros respectivos independientes que se han definido para realizar los ensayos, estos son velocidad de corte, avance por diente y flujo volumétrico en el sistema MQL.

**Tabla 10.** Niveles y parámetros independientes.

| Nivel | MQL<br>[ml/h]                 | Vcef<br>[m/min] | Avance fz<br>[mm/diente] | Profundidad<br>ap, ae [mm] | Herramienta   |
|-------|-------------------------------|-----------------|--------------------------|----------------------------|---|
| 1     | Aceite Sintético<br>50 [ml/h] | 180             | 0,05                     | 0,2                        | Carburo con<br>revestimiento<br>FIREX<br>(TiAlN)<br>[Guhring] |
| 2     | Aceite Vegetal<br>25 [ml/h]   | 200             | 0,1                      | 0,2                        |   |
| 3     | Aceite Vegetal<br>50 [ml/h]   | 220             | 0,15                     | 0,2                        |   |

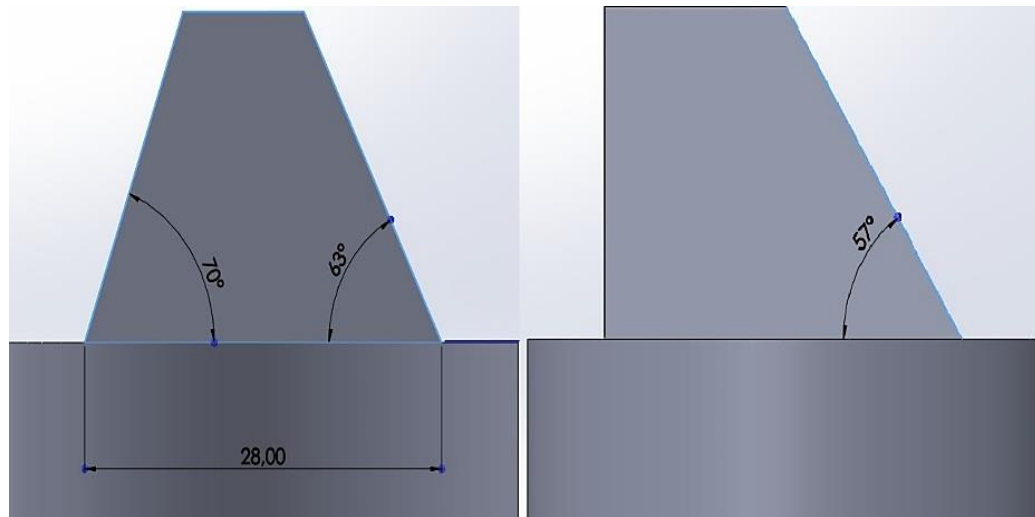
Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

Como se explicó anteriormente, el parámetro independiente de análisis será la rugosidad superficial ( $R_a$ ), ya que es un dato que nos proporciona el equipo de medición.

## 2.6. Diseño CAD

A través del software de diseño mecánico *Solidworks* se realizó el diseño de la probeta para realizar los diferentes ensayos o pruebas, considerando que los ensayos o pruebas serán realizadas sobre superficies 3D.

Por lo tanto, esta probeta contiene tres pendientes definidas en  $57^\circ$ ,  $63^\circ$  y  $70^\circ$ , las mismas que permiten variar la velocidad de corte  $V_c$ , mediante la variación del diámetro efectivo ( $D_{eff}$ ) de la herramienta en contacto con la superficie inclinada, estos ángulos de inclinación o pendientes se observan a detalle en la Figura 19.



**Figura 19.** Probeta modelo CAD para la experimentación.  
Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

Como se explicó anteriormente, la inclinación o pendiente de la probeta determina la velocidad efectiva de corte, variando de esta manera el cálculo con el diámetro efectivo de la herramienta y obteniendo las velocidades de 180, 200 y 220 [m/min] respectivamente, estos valores son mostrados en la Tabla 11, en donde además se observa el resultado del cálculo del diámetro efectivo obtenido aplicando la Ecuación 4 y la velocidad de avance encontrada con la Ecuación 3 del capítulo anterior.

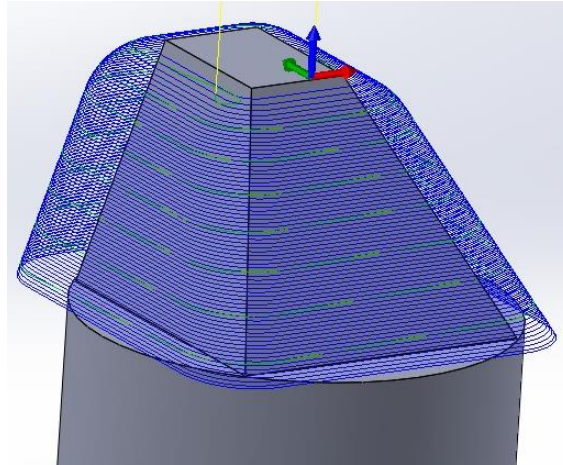
**Tabla 11.** Resultados obtenidos de velocidad de avance y velocidad de corte efectiva.

| <b>Pendiente</b><br>[°] | <b>N</b><br>[rpm] | <b>Def</b><br>[mm] | <b>Vcef</b><br>[m/min] | <b>Vf</b><br>[mm/min] | <b>Profundidad</b><br><b>ap, ae</b> [mm] |
|-------------------------|-------------------|--------------------|------------------------|-----------------------|--|
| 57                      | 6000              | 9,59               | 180                    | 1200                  | 0,2                                      |
| 63                      | 6000              | 10,60              | 200                    | 2400                  | 0,2                                      |
| 70                      | 6000              | 11,64              | 220                    | 3600                  | 0,2                                      |

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

## 2.7. Diseño CAM

De la misma manera y con la ayuda del software especializado HSM de *Solidworks* se procedió a realizar la simulación del mecanizado fresado 3D utilizando la estrategia de contorno en descenso (CD) explicado a detalle en la Figura 7 del capítulo anterior, esto se puede observar en detalle en la Figura 20.



**Figura 20.** Contorno en Descenso (CD).  
Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

## 2.8. Programación CAM

Para la programación, HSM Works es el software seleccionado tanto por su entorno amigable con el usuario y por el fácil acceso a los estudiantes al momento de desarrollar la programación paso a paso; así como también la simulación previa antes de realizar el maquinado en el equipo CNC. De esta manera se siguen los pasos detallados a continuación para realizar los experimentos:

- a) Selección del material para realizar las probetas, el mismo tiene las medidas de 100 x 100 x 50mm ya que lo distribuyen en forma de eje con diámetro 50mm.
- b) Diseño de la probeta en el ambiente virtual con sus respectivas pendientes.
- c) Uso del complemento HSM CAM para la simulación previa del proceso de fresado.
- d) Configuración de los parámetros de desbaste y semiacabado de las probetas con fresas de 10 y 14mm de diámetro.
- e) Establecer las condiciones de avance, así como las velocidades de corte para el proceso de acabado de las probetas con la fresa de punta esférica.
- f) Efectuar el posprocesamiento de la simulación para obtener los códigos en los cuales trabaja la fresadora CNC.
- g) Buscar posibles códigos que puedan generar conflictos con el equipo.
- h) Colocar el acero AISI 4140 a mecanizar e iniciar el programa de mecanizado.
- i) Repetir el mismo procedimiento, cambiando los parámetros según sea requerido y establecido.

## 2.9. Arreglo ortogonal del método Taguchi

El arreglo ortogonal (AO) se lo encuentra con los parámetros variables definidos anteriormente, en este caso son tres parámetros y se obtiene de la ecuación 10, este arreglo sirve para facilitar el desarrollo de la experimentación y obtener el número preciso de ensayos a experimentar, el arreglo ortogonal es el siguiente:

$$3^3 = 27$$

Por lo tanto, el número de ensayos a realizar será de 27 combinaciones. El arreglo ortogonal y las diferentes combinaciones se obtienen rápidamente gracias a la utilización de un software especializado, las combinaciones de los tres factores dan como resultado un arreglo ortogonal L27 presentado en la Tabla 12.

**Tabla 12.** Arreglo Taguchi ortogonal (AO) L27 para la experimentación.

| <b>Ensayo<br/>Nº</b> | <b>A<br/>MQL</b> | <b>B<br/>Vc</b> | <b>C<br/>Avance</b> |
|----------------------|------------------|-----------------|---------------------|
| 1                    | 1                | 1               | 1                   |
| 2                    | 1                | 1               | 2                   |
| 3                    | 1                | 1               | 3                   |
| 4                    | 1                | 2               | 1                   |
| 5                    | 1                | 2               | 2                   |
| 6                    | 1                | 2               | 3                   |
| 7                    | 1                | 3               | 1                   |
| 8                    | 1                | 3               | 2                   |
| 9                    | 1                | 3               | 3                   |
| 10                   | 2                | 1               | 1                   |
| 11                   | 2                | 1               | 2                   |
| 12                   | 2                | 1               | 3                   |
| 13                   | 2                | 2               | 1                   |
| 14                   | 2                | 2               | 2                   |
| 15                   | 2                | 2               | 3                   |
| 16                   | 2                | 3               | 1                   |
| 17                   | 2                | 3               | 2                   |
| 18                   | 2                | 3               | 3                   |
| 19                   | 3                | 1               | 1                   |
| 20                   | 3                | 1               | 2                   |
| 21                   | 3                | 1               | 3                   |
| 22                   | 3                | 2               | 1                   |
| 23                   | 3                | 2               | 2                   |
| 24                   | 3                | 2               | 3                   |
| 25                   | 3                | 3               | 1                   |
| 26                   | 3                | 3               | 2                   |
| 27                   | 3                | 3               | 3                   |

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

Una vez realizado el arreglo en el programa como se mostró en la Tabla 12, se reemplaza los valores de los diferentes factores variables de la experimentación, esta información se la observa en detalle en la Tabla 13.

**Tabla 13.** Ordenamiento de las combinaciones de parámetros y factores.

| <b>Ensayo<br/>N°</b> | <b>MQL<br/>[ml/h]</b> | <b>Vc<br/>[m/min]</b> | <b>fz<br/>[mm/diente]</b> |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| 1                    | Sintético [50]        | 180                   | 0,05                      |
| 2                    | Sintético [50]        | 180                   | 0,1                       |
| 3                    | Sintético [50]        | 180                   | 0,15                      |
| 4                    | Sintético [50]        | 200                   | 0,05                      |
| 5                    | Sintético [50]        | 200                   | 0,1                       |
| 6                    | Sintético [50]        | 200                   | 0,15                      |
| 7                    | Sintético [50]        | 220                   | 0,05                      |
| 8                    | Sintético [50]        | 220                   | 0,1                       |
| 9                    | Sintético [50]        | 220                   | 0,15                      |
| 10                   | Vegetal [25]          | 180                   | 0,05                      |
| 11                   | Vegetal [25]          | 180                   | 0,1                       |
| 12                   | Vegetal [25]          | 180                   | 0,15                      |
| 13                   | Vegetal [25]          | 200                   | 0,05                      |
| 14                   | Vegetal [25]          | 200                   | 0,1                       |
| 15                   | Vegetal [25]          | 200                   | 0,15                      |
| 16                   | Vegetal [25]          | 220                   | 0,05                      |
| 17                   | Vegetal [25]          | 220                   | 0,1                       |
| 18                   | Vegetal [25]          | 220                   | 0,15                      |
| 19                   | Vegetal [50]          | 180                   | 0,05                      |
| 20                   | Vegetal [50]          | 180                   | 0,1                       |
| 21                   | Vegetal [50]          | 180                   | 0,15                      |
| 22                   | Vegetal [50]          | 200                   | 0,05                      |
| 23                   | Vegetal [50]          | 200                   | 0,1                       |
| 24                   | Vegetal [50]          | 200                   | 0,15                      |
| 25                   | Vegetal [50]          | 220                   | 0,05                      |
| 26                   | Vegetal [50]          | 220                   | 0,1                       |
| 27                   | Vegetal [50]          | 220                   | 0,15                      |

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

## **2.10. Resultados de rugosidad media aritmética (Ra)**

Para realizar la medición de la calidad superficial o rugosidad media aritmética, se debe medir siempre perpendicular al sentido del mecanizado. Para tomar los datos se utilizó un rugosímetro Mitutoyo modelo SJ210, las características de esta herramienta de medición se encuentran detalladas en el capítulo previo. En la Figura 21 se observan los valores medidos de rugosidad en la superficie de la probeta con la ayuda del rugosímetro.



**Figura 21.** Medición de la rugosidad superficial.  
Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

En la Tabla 14 se encuentra en detalle los resultados de las mediciones de rugosidad de los 27 experimentos. Se repitieron tres mediciones en la superficie de cada probeta con la finalidad de confirmar similitudes entre valores y poder calcular el mejor resultado producto del promedio de estas.

**Tabla 14.** Resultados de Rugosidad (Ra).

| Ensayo<br>Nº | MQL<br>[ml/h] | Vc<br>[m/min] | fz<br>[mm/diente] | Ra 1<br>[µm] | Ra 2<br>[µm] | Ra 3<br>[µm] | Ra<br>Prom.<br>[µm] |
|--------------|---------------|---------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|---------------------|
| 1            | Sintético 50% | 180           | 0,05              | 1,209        | 1,297        | 1,275        | 1,260               |
| 2            | Sintético 50% | 180           | 0,1               | 1,190        | 1,291        | 1,265        | 1,249               |
| 3            | Sintético 50% | 180           | 0,15              | 1,421        | 1,449        | 1,489        | 1,453               |
| 4            | Sintético 50% | 200           | 0,05              | 0,956        | 1,036        | 1,091        | 1,028               |
| 5            | Sintético 50% | 200           | 0,1               | 1,178        | 1,264        | 1,093        | 1,178               |
| 6            | Sintético 50% | 200           | 0,15              | 1,908        | 1,720        | 1,918        | 1,849               |
| 7            | Sintético 50% | 220           | 0,05              | 0,948        | 1,023        | 1,031        | 1,001               |
| 8            | Sintético 50% | 220           | 0,1               | 0,906        | 0,894        | 0,912        | 0,904               |
| 9            | Sintético 50% | 220           | 0,15              | 1,286        | 1,366        | 1,420        | 1,357               |
| 10           | Vegetal 25%   | 180           | 0,05              | 1,671        | 1,577        | 1,596        | 1,615               |
| 11           | Vegetal 25%   | 180           | 0,1               | 1,892        | 1,728        | 1,756        | 1,792               |
| 12           | Vegetal 25%   | 180           | 0,15              | 1,796        | 1,579        | 1,587        | 1,654               |
| 13           | Vegetal 25%   | 200           | 0,05              | 0,910        | 1,045        | 0,952        | 0,969               |
| 14           | Vegetal 25%   | 200           | 0,1               | 0,844        | 0,984        | 0,979        | 0,936               |
| 15           | Vegetal 25%   | 200           | 0,15              | 1,629        | 1,540        | 1,205        | 1,458               |
| 16           | Vegetal 25%   | 220           | 0,05              | 0,868        | 0,904        | 0,977        | 0,916               |
| 17           | Vegetal 25%   | 220           | 0,1               | 0,880        | 0,868        | 0,902        | 0,883               |
| 18           | Vegetal 25%   | 220           | 0,15              | 1,170        | 1,100        | 1,071        | 1,114               |
| 19           | Vegetal 50%   | 180           | 0,05              | 1,179        | 1,224        | 1,219        | 1,207               |
| 20           | Vegetal 50%   | 180           | 0,1               | 1,194        | 1,292        | 1,182        | 1,223               |
| 21           | Vegetal 50%   | 180           | 0,15              | 1,385        | 1,479        | 1,470        | 1,445               |
| 22           | Vegetal 50%   | 200           | 0,05              | 0,906        | 0,836        | 0,910        | 0,884               |
| 23           | Vegetal 50%   | 200           | 0,1               | 1,107        | 1,155        | 1,130        | 1,131               |
| 24           | Vegetal 50%   | 200           | 0,15              | 1,431        | 1,582        | 1,407        | 1,473               |
| 25           | Vegetal 50%   | 220           | 0,05              | 0,859        | 0,865        | 0,844        | 0,856               |
| 26           | Vegetal 50%   | 220           | 0,1               | 1,024        | 1,057        | 1,127        | 1,069               |
| 27           | Vegetal 50%   | 220           | 0,15              | 1,088        | 1,034        | 0,946        | 1,023               |

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

Previo al Capítulo siguiente es necesario decir que el presente trabajo de titulación consiste en el análisis comparativo del acabado o rugosidad superficial obtenida por la influencia del sistema MQL en el fresado 3D, usando lubricantes de origen vegetal y sintético, por lo tanto, se desea determinar los efectos que causa los lubricantes vegetal y sintético en la calidad superficial, limitando al uso de los lubricantes como principal factor de comparación en el análisis de la rugosidad obtenida producto del fresado 3D del acero AISI 4140.

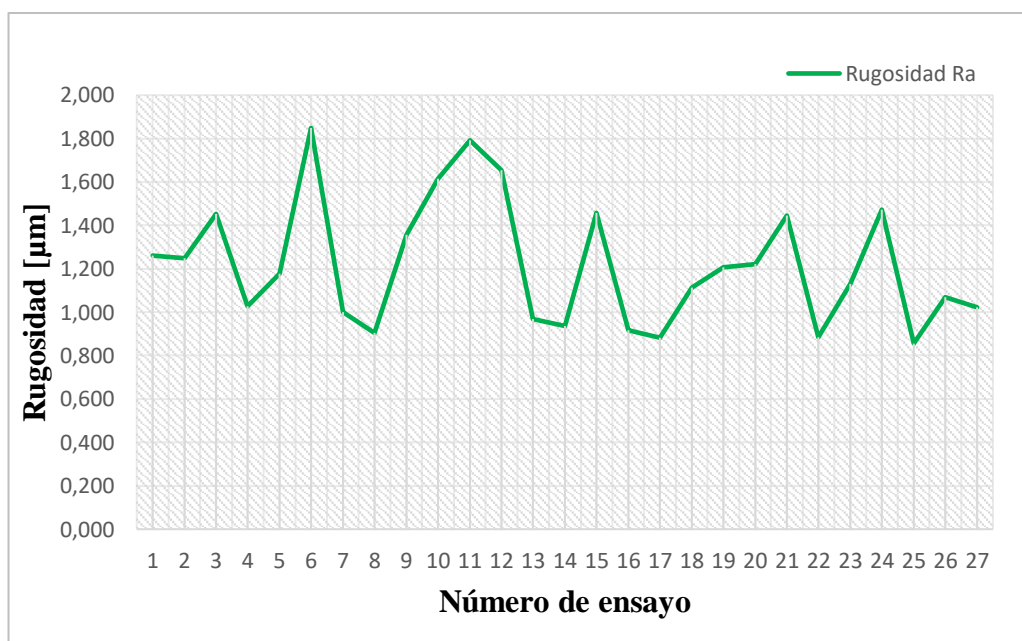
### CAPÍTULO III

#### ANÁLISIS DE RESULTADOS

El capítulo presente se enfoca en analizar los resultados obtenidos de la rugosidad superficial al realizar 27 ensayos como se planteó anteriormente según el método Taguchi, posterior a ello se determina cual fue el ensayo con mejor rugosidad superficial, luego se procede a comparar la rugosidad factor a factor A, B y C, es decir se analiza, por lubricante, velocidad de corte y avance, obteniendo el mejor resultado para cada uno de estos factores respectivamente. Con el método estadístico de Taguchi y con la ayuda del software especializado también estadístico se obtiene la ecuación de regresión que permite predecir la rugosidad superficial en cualquier ensayo, si se utilizan los mismos factores establecidos en este trabajo. Mediante la metodología ANOVA, se encuentra el parámetro de influencia mayoritaria en el mecanizado del presente estudio.

#### 3.1. Análisis de rugosidad media (Ra) de la experimentación

En la Figura 22 se observa la rugosidad superficial en los 27 ensayos realizados y se aprecia que el ensayo 25 es el punto más bajo de todos, por lo tanto, es el mejor resultado.



**Figura 22.** Rugosidad obtenida en cada ensayo.  
Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia



Para la Figura anterior, el mejor valor de rugosidad obtenido en los 27 ensayos es 0,856 [ $\mu\text{m}$ ], este valor es el correspondiente al experimento 25, bajo la combinación de los parámetros de aceite vegetal con un volumen de 50 [ml/h], una velocidad de corte  $V_c$  de 220 [m/min] y un avance por diente  $f_z$  de 0,05 [mm/diente]. En la Tabla 15 se muestran los factores con los que se obtuvo este resultado.

**Tabla 15.** Experimento con mejor valor de rugosidad (Ra).

| <b>Ensayo</b><br><b>Nº</b> | <b>MQL</b><br><b>[ml/h]</b> | <b>Vc</b><br><b>[m/min]</b> | <b>fz</b><br><b>[mm/diente]</b> | <b>Rugosidad Ra</b><br><b>[<math>\mu\text{m}</math>]</b> |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--|
| 25                         | Vegetal<br>[50]             | 220                         | 0,05                            | 0,856  |

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

### 3.2. Análisis de rugosidad media (Ra) obtenida por variación MQL

En este análisis se realiza la primera importante comparación de las rugosidades obtenidas mediante el uso del sistema MQL y su variación de volumen en [ml/h], tanto para el uso de aceite sintético como con el aceite vegetal como refrigerante entre las superficies de contacto, obteniendo una media de rugosidad para cada parámetro MQL.

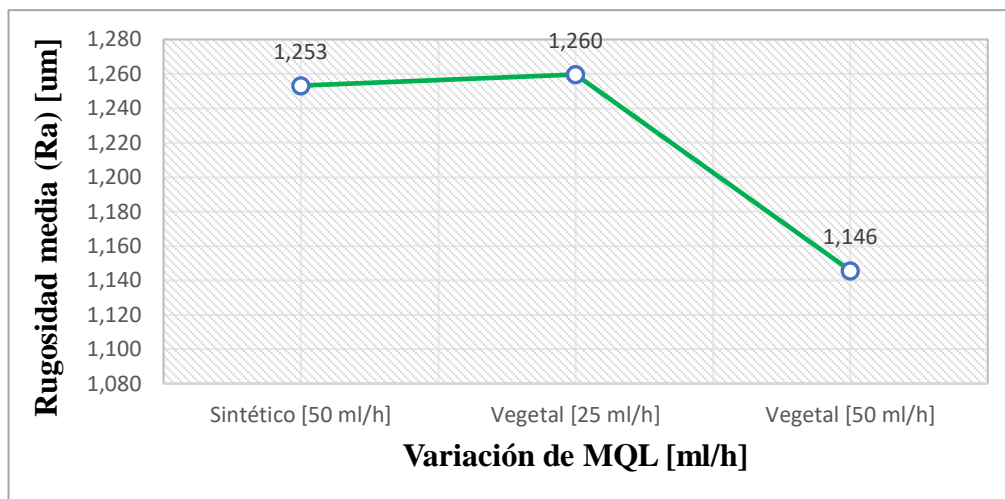
Estos valores se detallan a continuación en la Tabla 16.

**Tabla 16.** Rugosidad media por variación de MQL.

| <b>MQL [ml/h]</b> | <b>Rugosidad media [<math>\mu\text{m}</math>]</b> |
|-------------------|---|
| Sintético [50]    | 1,253   |
| Vegetal [25]      | 1,260   |
| Vegetal [50]      | 1,146   |

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

En la Figura 23 se observa la tendencia lineal que se genera por los valores obtenidos de la rugosidad media, variando el flujo volumétrico del sistema MQL con el uso del aceite sintético y vegetal respectivamente.



**Figura 23.** Rugosidad Ra media vs variación MQL.  
Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

Los parámetros de MQL que se seleccionaron para los distintos ensayos son 25 y 50 [ml/h] ya que los parámetros del equipo disponible poseen estos valores de configuración.

En la Figura 23 se aprecia que la mejor rugosidad media aritmética se obtiene usando aceite vegetal en el sistema MQL con un flujo volumétrico de 50 [ml/h], en tanto que la rugosidad aumenta su valor con el uso de aceite sintético y flujo de 50 [ml/h]; finalmente, el valor de rugosidad media más alta se observa que es con el uso de aceite vegetal en el sistema MQL con flujo de 25 [ml/h].

El uso de aceite vegetal en el sistema de mínima cantidad de lubricación, con flujo volumétrico de 50 [ml/h], mejora la rugosidad en un 9% respecto al uso de aceite sintético y en un 10% respecto al uso de aceite vegetal con MQL de 25 [ml/h]. Estos porcentajes de mejoramiento se los detalla a continuación en la Tabla 17.

**Tabla 17.** Reducción del porcentaje del mejor resultado con respecto al resto por la variación de MQL.

| Resultado      |                            | Mejor resultado |                            |                         |
|----------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|-------------------------|
| MQL [ml/h]     | Ra Prom. [ $\mu\text{m}$ ] | MQL [ml/h]      | Ra Prom. [ $\mu\text{m}$ ] | Porcentaje reducido [%] |
| Sintético [50] | 1,253                      | Vegetal         | 1,146                      | 9                       |
| Vegetal [25]   | 1,260                      | [50]            |                            | 10                      |

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

### 3.3. Análisis de rugosidad media (Ra) por velocidad de corte

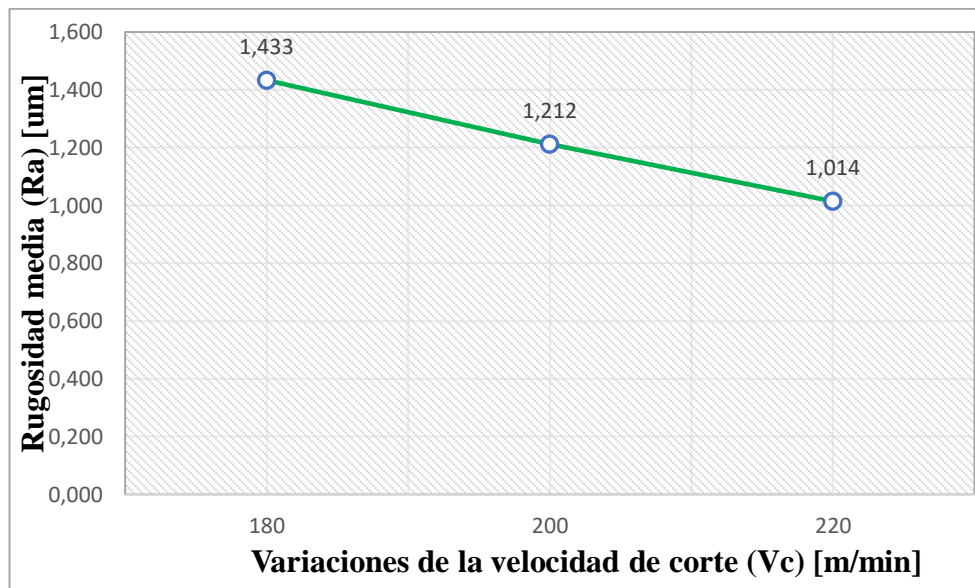
En este análisis se compara las rugosidades obtenidas con la variación de la velocidad efectiva de corte, es decir los valores de 180, 200 y 220 [m/min], obteniendo una media de rugosidad para cada variación, estos valores de rugosidad se indican en la Tabla 18.

**Tabla 18.** Rugosidad media por variación de velocidad de corte.

| Vc      | Rugosidad media   |
|---------|-------------------|
| [m/min] | [ $\mu\text{m}$ ] |
| 180     | 1,433             |
| 200     | 1,212             |
| 220     | 1,014             |

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

El mejor valor de rugosidad media se obtiene cuando el parámetro de la velocidad de corte toma un valor de 220 [m/min], en la Figura 24 se puede apreciar la tendencia lineal de la rugosidad que se genera variando la velocidad de corte Vc.



**Figura 24.** Rugosidad media vs variación de velocidad de corte Vc.

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

El valor de 220 [m/min] definido para la velocidad, obtiene la mejor calidad superficial en este análisis y disminuye en un 29% la rugosidad respecto a la variación de velocidad con valor de 180 [m/min], de la misma manera supera la rugosidad del parámetro de velocidad definido de 200 [m/min] en un 16%.

De esta manera se puede decir que la velocidad de corte más alta y establecida dentro de los valores permitidos de la herramienta definidos por el fabricante mejora la calidad superficial. En la Tabla 19 se puede apreciar los porcentajes de variación de la rugosidad en el parámetro de velocidad de corte.

**Tabla 19.** Reducción del porcentaje del mejor resultado con respecto a los demás por variación de velocidad de corte (Vc).

| <b>Resultado</b>  |                      | <b>Mejor resultado</b> |                      | <b>Porcentaje reducido [%]</b> |
|-------------------|----------------------|------------------------|----------------------|--------------------------------|
| <b>Vc [m/min]</b> | <b>Ra Prom. [μm]</b> | <b>Vc [m/min]</b>      | <b>Ra Prom. [μm]</b> |                                |
| 180               | 1,433                | 220                    | 1,014                | 29                             |
| 200               | 1,212                |                        |                      | 16                             |

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

#### 3.4. Análisis de rugosidad (Ra) media por avance por diente (fz)

Este análisis compara las rugosidades obtenidas con el último parámetro variable; es decir el parámetro de avance por diente (fz) que toma los valores de 0,05, 0,10 y 1,15 [mm/diente], obteniendo una media de rugosidad para cada variación. Estos valores se indican en la Tabla 20.

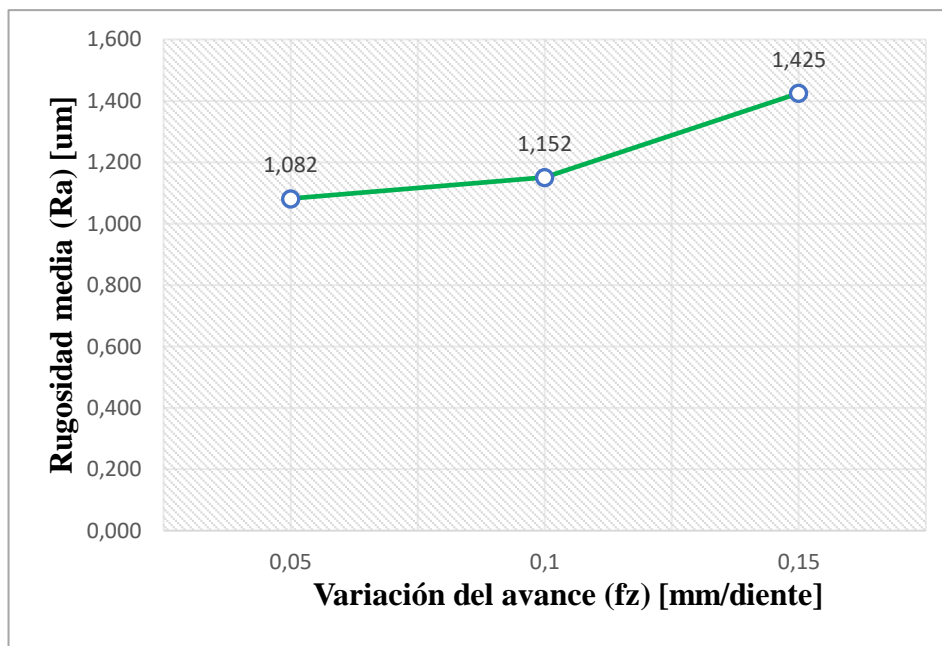
**Tabla 20.** Rugosidad media por variación de avance por diente (fz).

| <b>fz [mm/diente]</b> | <b>Rugosidad media [μm]</b> |
|-----------------------|-----------------------------|
| 0,05                  | 1,082                       |
| 0,10                  | 1,152                       |
| 0,15                  | 1,425                       |

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

La mejor calidad superficial media según los datos de la tabla anterior es aquella donde el factor de avance toma el valor de 0,05 [mm/diente].

En la Figura 25 se observa la tendencia generada por los valores de rugosidad media (Ra), variando el parámetro de avance por diente (fz).



**Figura 25.** Rugosidad Ra media vs variación de avance por diente (fz).  
Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

Como se indicó anteriormente el mejor valor de rugosidad se obtiene con un avance por diente de 0,05 [mm/diente]. Esto mejora la rugosidad media respecto a las otras dos variaciones restantes de avance de 0,1 y 0,15 [mm/diente] en 6% y 24% respectivamente. Para una mejor apreciación de estos porcentajes se presenta a continuación la Tabla 21.

**Tabla 21.** Reducción del porcentaje del mejor resultado con respecto a los demás por variación de velocidad de corte ( $V_c$ ).

| Resultado      |               | Mejor resultado |               |                         |
|----------------|---------------|-----------------|---------------|-------------------------|
| fz [mm/diente] | Ra Prom. [µm] | fz [mm/diente]  | Ra Prom. [µm] | Porcentaje reducido [%] |
| 0,10           | 1,152         | 0,05            | 1,082         | 6                       |
| 0,15           | 1,425         |                 |               | 24                      |

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

Del análisis análogo previo se determina que el factor variable más influyente en los ensayos es la velocidad de corte ( $V_c$ ), seguido del avance por diente (fz) y finalmente el lubricante con el uso del sistema MQL.

De la misma manera luego del análisis se determina que los factores variables como son: lubricante con sistema MQL, velocidad de corte ( $V_c$ ) y avance por diente ( $f_z$ ), toman valores específicos para lograr la mejor superficie del material en términos de rugosidad ( $R_a$ ), estos valores se observan en la Tabla 22.

**Tabla 22.** Valores que toman los factores variables para obtener la mejor calidad superficial.

| <b>MQL</b><br>[ml/h] | <b><math>V_c</math></b><br>[m/min] | <b><math>f_z</math></b><br>[mm/diente] | <b>Mejor Rugosidad <math>R_a</math></b><br>[ $\mu\text{m}$ ] |
|----------------------|------------------------------------|--|--|
| Aceite vegetal [50]  | 220                                | 0,05                                   | 0,856  |

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

### 3.5. Rugosidad por variación MQL en velocidad de corte

Como se determinó anteriormente, el factor de mayor influencia es la velocidad de corte, por lo tanto, en la Tabla 23 se muestra el promedio de rugosidad de la variación de los tres niveles de MQL respecto a la velocidad de corte.

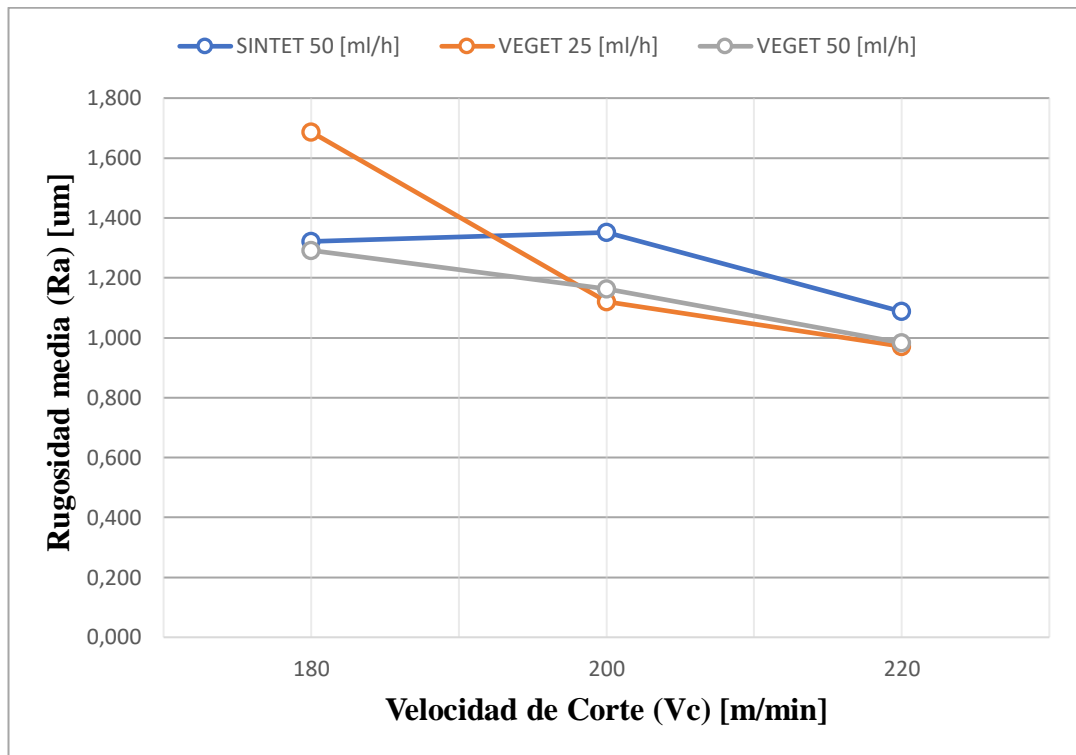
**Tabla 23.** Rugosidad por variación MQL en velocidad de corte ( $V_c$ ).

| <b><math>V_c</math></b><br>[m/min] | <b>MQL</b><br>[ml/h]  | <b>Rugosidad <math>R_a</math></b><br>[ $\mu\text{m}$ ] |
|------------------------------------|-----------------------|--|
| 180                                | Aceite sintético [50] | 1,321  |
|                                    | Aceite vegetal [25]   | 1,687  |
|                                    | Aceite vegetal [50]   | 1,292  |
| 200                                | Aceite sintético [50] | 1,352  |
|                                    | Aceite vegetal [25]   | 1,121  |
|                                    | Aceite vegetal [50]   | 1,163  |
| 220                                | Aceite sintético [50] | 1,087  |
|                                    | Aceite vegetal [25]   | 0,971  |
|                                    | Aceite vegetal [50]   | 0,983  |

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

En la Figura 26 se muestra el resultado de la rugosidad que se obtiene del promedio de la variación de los tres niveles MQL respecto a la velocidad de corte. Se puede notar

que los valores son muy cercanos entre sí, por lo tanto, se dice que la variación de MQL es un factor poco influyente para este punto.



**Figura 26.** Variación de rugosidad por MQL en velocidad de corte.  
Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

Se concluye entonces de la Figura 26 que se puede usar tanto aceite vegetal como aceite sintético obteniendo como resultado valores de rugosidad cercanos, entre 1,687 [μm] y 0,971 [μm] con una ligera ventaja al usar aceite vegetal en el sistema MQL con el valor de rugosidad más baja de 0,971 [μm], lo cual justifica el presente estudio, puesto que, el aceite vegetal es menos perjudicial para la salud del operador, es más amigable para el medio ambiente y por último es más económico respecto al uso del aceite sintético.

### 3.6. Rugosidad por variación de avance (fz) en velocidad de corte

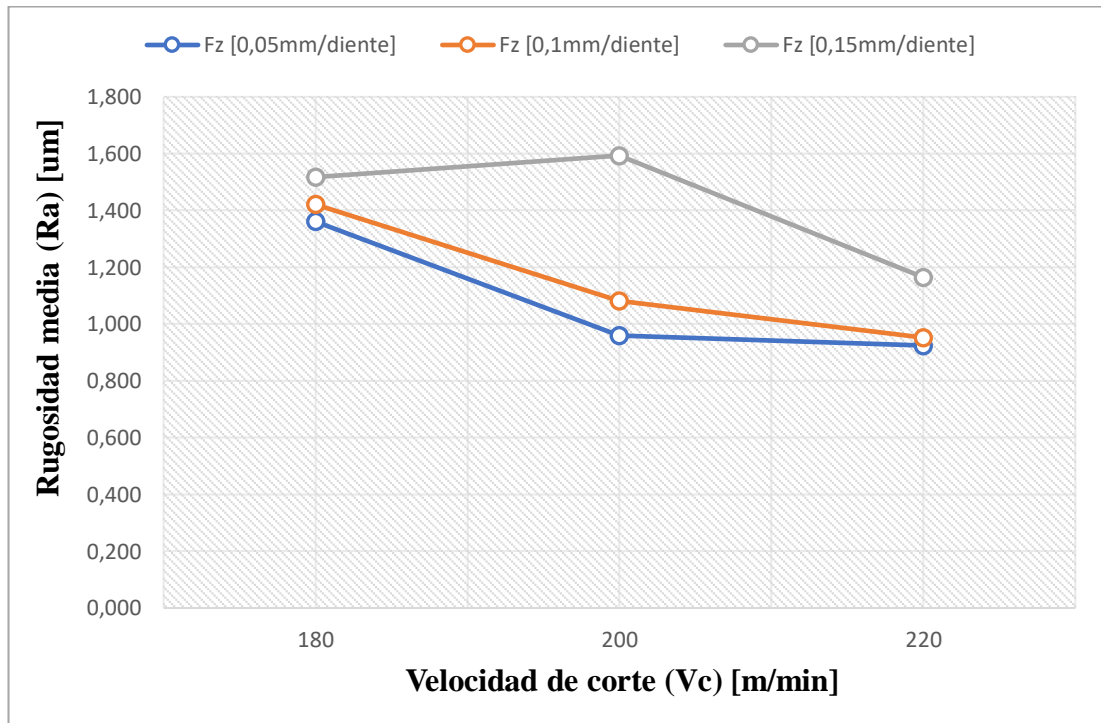
En la Tabla 24 se muestra el promedio de rugosidad de la variación de los tres niveles de avance (fz) respecto al factor de mayor influencia en este estudio el cual es la velocidad de corte.

**Tabla 24.** Rugosidad por variación de avance (fz) en velocidad de corte.

| Vc<br>[m/min] | fz<br>[mm/diente] | Rugosidad Ra<br>[μm] |
|---------------|-------------------|----------------------|
| 180           | 0,05              | 1,361                |
|               | 0,1               | 1,421                |
|               | 0,15              | 1,517                |
| 200           | 0,05              | 0,960                |
|               | 0,1               | 1,082                |
|               | 0,15              | 1,593                |
| 220           | 0,05              | 0,924                |
|               | 0,1               | 0,952                |
|               | 0,15              | 1,165                |

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

En la Figura 27 se observan los resultados obtenidos de la rugosidad promedio de la variación del avance (fz) respecto a la velocidad de corte.



**Figura 27.** Variación de rugosidad por avance (fz) en velocidad de corte.

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia



Como se aprecia en la Figura 27, la mejor rugosidad se obtiene bajo los parámetros de velocidad de 220 [m/min] y un avance por diente fz de 0,05 [mm/diente], se observa también una tendencia similar de la curva al usar el avance por diente fz de 0,1 [mm/diente], las cuales tienden a mejorar la rugosidad superficial conforme aumenta la velocidad de corte, mientras que cuando se combina el avance de 0,15 [mm/diente] y velocidad de corte de 200 [m/min], la rugosidad aumenta en un 42% respecto al mejor resultado.

### 3.7. Método ANOVA

El método ANOVA permite comprobar los factores y parámetros y su interacción con el cuadrado medio de los errores experimentales estimados, en varios niveles específicos de confianza.

Para realizar el análisis y cálculo se usan las ecuaciones descritas dentro del capítulo uno, el siguiente ejemplo muestra cómo se realiza el cálculo del factor A, mismo que pertenece a la estrategia de mecanizado.

#### 3.7.1. Modelo de cálculo para el factor A

Sumatoria de los resultados

$$\sum_{i=1}^{27} Ra_i = 1,260 + 1,249 + 1,453 \dots \dots \dots + 1,069 + 1,023 = 32,913$$

El factor de corrección CF se calcula con la utilización de la ecuación 15.

$$CF = \frac{32,913^2}{27} = 40,120$$

En la Ecuación 14 se describe la sumatoria de cuadrados.

$$S_T = (1,587 + 1,56 + 2,111 \dots \dots \dots + 1,142 + 1,046) - 40,120$$

$$S_T = 42,305 - 40,120 = 2,185$$

Cálculo del Factor por medio de la suma de cuadrados.

$$S_A = \frac{A_1^2}{n_{A1}} + \frac{A_2^2}{n_{A2}} + \frac{A_3^2}{n_{A3}} - CF$$

Donde:

$n_{Ai}$ : Es el número de ensayos de los niveles del Factor A.

$A_i$ : Representa la sumatoria de resultados de rugosidad de los niveles.

$$S_A = \frac{11,279^2}{9} + \frac{11,337^2}{9} + \frac{10,297^2}{9} - 40,120 = 0,076$$

La varianza está dada en la Ecuación 11.

$$V_A = \frac{S_A}{f_A} = \frac{0,076}{2} = 0,038$$

El cálculo del grado de libertad del factor A es:

$$f_A = 3 - 1 = 2$$

Entonces, el error se estima de la siguiente manera:

$$e = S_T - (S_A + S_B + S_c)$$
$$e = 2,185 - (0,076 + 0,792 + 0,596) = 0,721$$

La varianza del error se calcula como:

$$V_e = \frac{e}{DF} = \frac{0,721}{18} = 0,040$$

Para el cálculo del valor F del factor A se lo realiza con la ecuación 12 dada en el capítulo uno, misma que es:

$$F_A = \frac{V_A}{V_e}$$

$$F_A = \frac{0,038}{0,040} = 0,946$$

Mediante la Ecuación 13 se obtiene el porcentaje que influye el factor A, dando como resultado:

$$P_A = \frac{S_A}{S_T} \cdot 100\%$$

$$P_A = \frac{0,076}{2,185} \cdot 100 = 3,469 \%$$

### 3.7.2. Prueba F

En esta prueba se realiza una comparación del valor obtenido de la Tabla 25 de distribución y con el rango de confiabilidad del 95 %, dando como resultado que el parámetro por estimar esté en ese rango estadístico de confianza, esto dictamina que existe una posibilidad de riesgo del 5% de cometer errores de hipótesis alternativa.

En la siguiente Tabla, la primera columna representa el grado de libertad del denominador para los factores f. Para el caso de análisis, el denominador es de orden 18 que corresponde al grado de libertad del DF del arreglo ortogonal (AO).

**Tabla 25.** Distribución F ( $\alpha = 0,05$  en la cola a la derecha) [54].

|  |    | <b>Grado de libertad del numerador</b> |      |      |      |
|--|----|--|------|------|------|
|  |    | 1                                      | 2    | 3    | 4    |
| <b>Grado de libertad del denominador</b> | 16 | 4,49                                   | 3,63 | 3,24 | 3,01 |
|  | 17 | 4,45                                   | 3,59 | 3,19 | 2,96 |
|  | 18 | 4,41                                   | 3,55 | 3,15 | 2,93 |
|  | 19 | 4,38                                   | 3,52 | 3,12 | 2,90 |

De la Tabla anterior se obtiene que el valor F (0,05:2:18) es igual a 3,55 por tanto, dicho valor es mayor que lo calculado de  $F_A = 0,946$  entonces, se concluye que una hipótesis nula no tiene una diferencia significativa estadística en sus factores.

**Tabla 26.** Resultados método ANOVA.

| <b>Fuente/Factor</b> | <b>DF</b> | <b>S</b> | <b>V</b> | <b>Valor F</b> | <b>%P</b> |
|----------------------|-----------|----------|----------|----------------|-----------|
| <b>A (MQL)</b>       | 2         | 0,076    | 0,038    | 0,946          | 3,469     |
| <b>B (Vc)</b>        | 2         | 0,792    | 0,396    | 9,891          | 36,260    |
| <b>C (Avance)</b>    | 2         | 0,596    | 0,298    | 7,441          | 27,278    |
| <b>Error</b>         | 18        | 0,741    | 0,041    |                | 32,993    |
| <b>ST (total)</b>    | 26        | 2,185    |          |                | 100       |

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

La hipótesis nula asevera que el factor de análisis no tiene diferencia significativa estadística del origen en las variaciones, por consiguiente, no es influente en el estudio. De otra manera asevera la hipótesis alternativa, que, si el factor de análisis tiene diferencia significativa estadística del origen en las variaciones, será un factor de influencia del experimento.

### 3.7.3. Prueba de la hipótesis

El valor obtenido de la Tabla 25 (0,05:2:18) es 3,55 que en comparación al valor  $F_A=0,946$ , es mayor, su factor no tiene diferencia significativa estadística del origen en las variaciones, por lo tanto, el parámetro A, que corresponde a “lubricante del MQL”, admite la nulidad de la hipótesis.

Para el caso del parámetro B correspondiente a velocidad de corte, el valor F que converge en  $F_B$  (0,05:2:18), es 3,55, es menor que el encontrado en el cálculo de  $F_B=9,891$ , entonces, este factor si tiene significativa diferencia estadística en el origen de las variaciones, por lo tanto, el factor B, que corresponde a “velocidad de corte Vc”, admite la hipótesis alternativa.

Para el parámetro C (fz), el valor F que converge en FC (0,05:2:18) que es igual a 3,55 y es mayor que el encontrado en el cálculo de  $F_B=7,441$ , entonces, su factor si tiene significativa diferencia estadística en el origen de las variaciones, el parámetro C que corresponde al “avance por diente fz” admite la hipótesis alternativa.

#### 3.7.4. Análisis de varianza

Taguchi insiste en el estudio de la variación de los resultados usando la correspondencia de ruido/señal (N/S), identificando la adecuada disposición de los parámetros de control que hacen que el desarrollo del proceso sea fuerte frente a variaciones provocadas por factores de ruido. Los resultados de varianza encontrados en el experimento se muestran en la Tabla 27.

**Tabla 27.** Resultados de varianza de los niveles según sus parámetros.

| Niveles   | A (MQL) | B (Vc) | C (fz) |
|-----------|---------|--------|--------|
| 1         | 1,253   | 1,433  | 1,080  |
| 2         | 1,260   | 1,210  | 1,152  |
| 3         | 1,144   | 1,014  | 1,425  |
| Rango     | 3       | 1      | 2      |
| Variación | 0,115   | 0,419  | 0,345  |
| Promedio  | 1,219   |        |        |

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

Donde:

$$Variación_{A,B,C} = Promedio niveles_{max} - Promedio niveles_{min} \quad (16)$$

Por medio del cálculo obtenemos que:

$$Variación_A = 1,260 - 1,144 = 0,115 [\mu m]$$

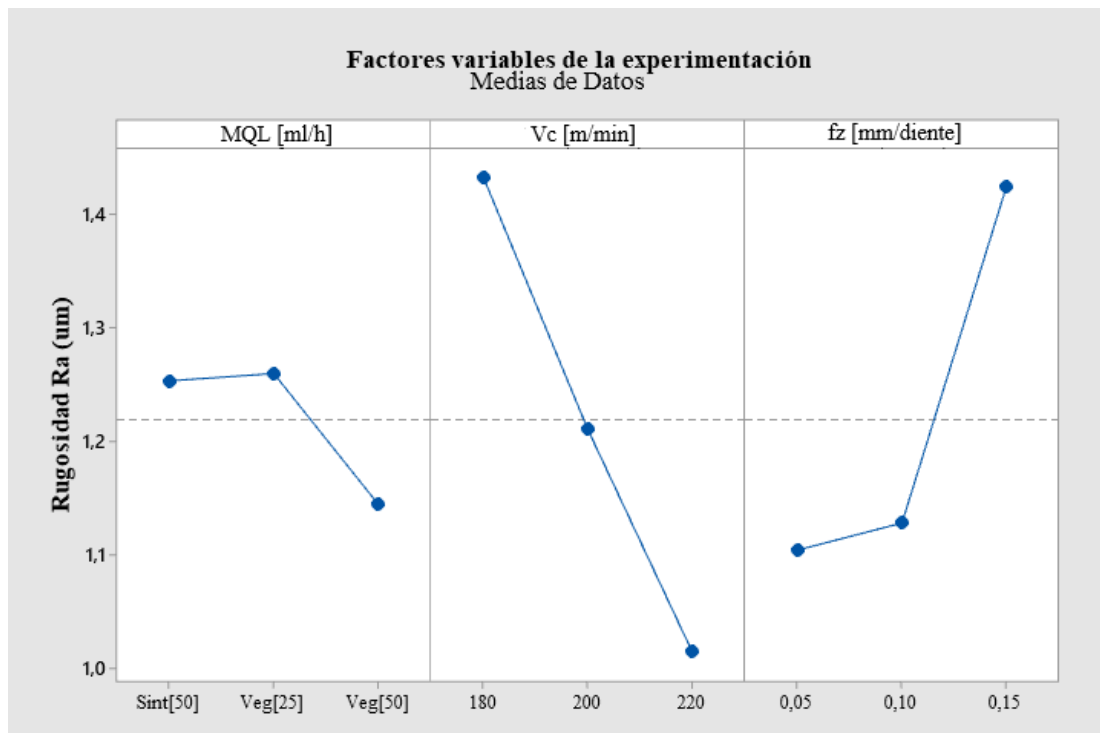
$$Variación_B = 1,433 - 1,014 = 0,419 [\mu m]$$

$$Variación_C = 1,425 - 1,104 = 0,321 [\mu m]$$

Como se observa anteriormente en la Tabla 27, el parámetro B adquiere la más alta varianza, por lo tanto, se cataloga con rango 1, es decir, se prueba que este parámetro es el de mayor influencia, seguido del parámetro C calificado con rango de influencia 2. Por otra parte, se observa que el parámetro A, obtiene la menor varianza, por lo tanto, se cataloga en el rango 3 manifestándose de esta manera como el parámetro menos influyente de este estudio.

### 3.8. Óptimos niveles de mecanizado

En base al análisis de varianza anteriormente realizado, se alcanzan los parámetros adecuados y óptimos para mecanizar mediante el proceso de fresado acabado 3D con la finalidad de lograr valores menores de rugosidad media (Ra). De lo anterior, la rugosidad superficial (Ra) mejor alcanzada es con un flujo volumétrico de 50 [ml/h] del aceite vegetal en el sistema MQL, con una velocidad de corte de 220 [m/min] y un avance de 0.15 [mm/diente], esto puede ser verificado en la Figura 28.



**Figura 28.** Efecto de los factores en operaciones de fresado 3D.  
Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

### 3.9. Predicción de rugosidad

Basado en análisis anteriores, la velocidad de corte es el factor más influyente de este estudio, seguido del avance por diente, es decir, influyen mayoritariamente en la

rugosidad de este experimento, de tal manera que se tomarán únicamente estos dos factores B y C para encontrar la ecuación de regresión, la cual anuncia la rugosidad media (Ra) basándose en los resultados obtenidos de la interrelación de los parámetros que más influyen en el experimento. Para obtener la ecuación de regresión se usa un software especializado de cálculo estadístico. La rugosidad que se prevé se muestra a continuación en la Ecuación 17.

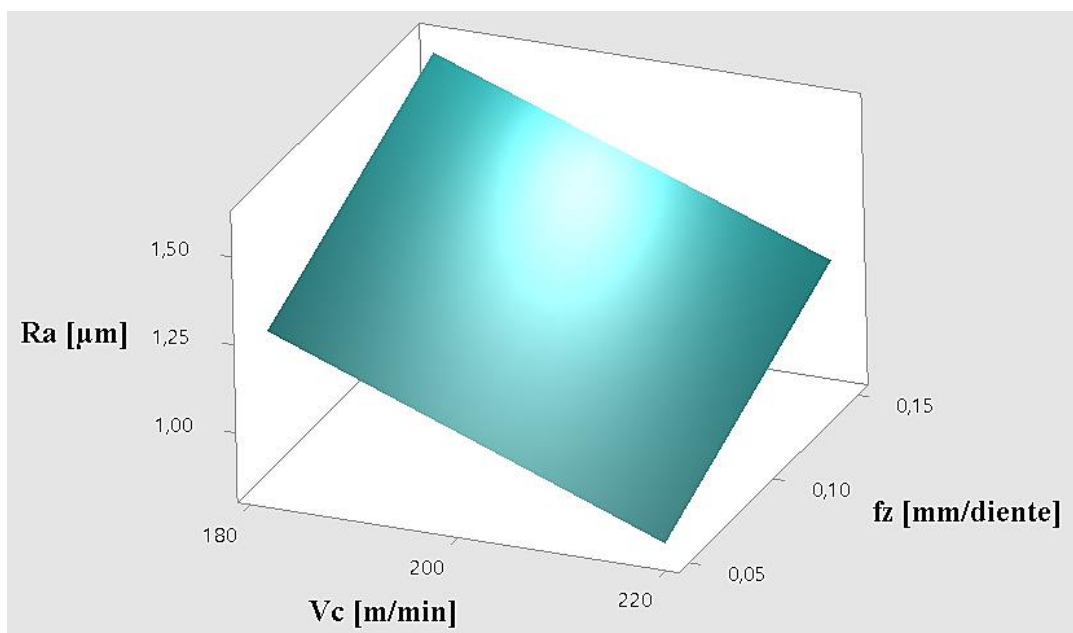
$$R_a = 3,17 - 0,01137 \cdot B + 2,5 \cdot C + 0,0033 \cdot B \cdot C \quad (17)$$

Donde:

$B = 180, 200, 220$  [m/min] (Velocidad de corte)

$C = 0,05; 0,1; 0,15$  [mm/diente] (Avance por diente)

Además, se obtiene la gráfica tridimensional de la interacción entre los parámetros de velocidad de corte y avance por diente, respecto a la rugosidad media (Ra) mostrada en la Figura 29.



**Figura 29.** Superficie de Ra [ $\mu\text{m}$ ] vs. fz [mm/diente]; Vc [m/min]  
Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

Se determina el porcentaje de error en la toma de medidas de los ensayos para reconocer la ecuación adquirida, se calcula matemáticamente la rugosidad de los experimentos que utilizan aceite vegetal en el sistema MQL con flujo de 50 [ml/h], los

valores calculados de los experimentos usando la ecuación 19 y el porcentaje de error se muestran en la Tabla 28.

**Tabla 28.** Porcentaje de error de las mediciones vs. rugosidad calculada.

| <b>Ensayo No</b> | <b>MQL 50 ml/h</b> | <b>Vc [m/min]</b> | <b>Avance fz [mm/ diente]</b> | <b>Ra calculada [μm]</b> | <b>Ra medida [μm]</b> | <b>Error [%]</b> |
|------------------|--------------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------|-----------------------|------------------|
| 19               | Vegetal            | 180               | 0,05                          | 1,266                    | 1,207                 | 4,933            |
| 20               | Vegetal            | 180               | 0,1                           | 1,421                    | 1,223                 | 16,284           |
| 21               | Vegetal            | 180               | 0,15                          | 1,576                    | 1,445                 | 9,134            |
| 22               | Vegetal            | 200               | 0,05                          | 1,054                    | 0,884                 | 19,231           |
| 23               | Vegetal            | 200               | 0,1                           | 1,212                    | 1,131                 | 7,193            |
| 24               | Vegetal            | 200               | 0,15                          | 1,37                     | 1,473                 | 7,014            |
| 25               | Vegetal            | 220               | 0,05                          | 0,841                    | 0,856                 | 1,740            |
| 26               | Vegetal            | 220               | 0,1                           | 1,002                    | 1,069                 | 6,274            |
| 27               | Vegetal            | 220               | 0,15                          | 1,163                    | 1,023                 | 13,759           |

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

De acuerdo con la Tabla 28 de resultados en la que se muestran los errores entre el valor medido y el valor calculado, estos van desde un 4,933 a 19,231%, por lo que se puede decir que es un error relativo mínimo debido a que no supera el 20% y es aceptable en las condiciones de mecanizado de este proyecto.

### **3.10. Comprobación de la rugosidad predicha**

Para validar la rugosidad, se procedió a mecanizar una nueva probeta con los parámetros de maquinado adecuados encontrados estadísticamente en el análisis anterior, dichos parámetros adecuados para el mecanizado se muestran en la Tabla 29, además de la rugosidad media (Ra) pretendida.

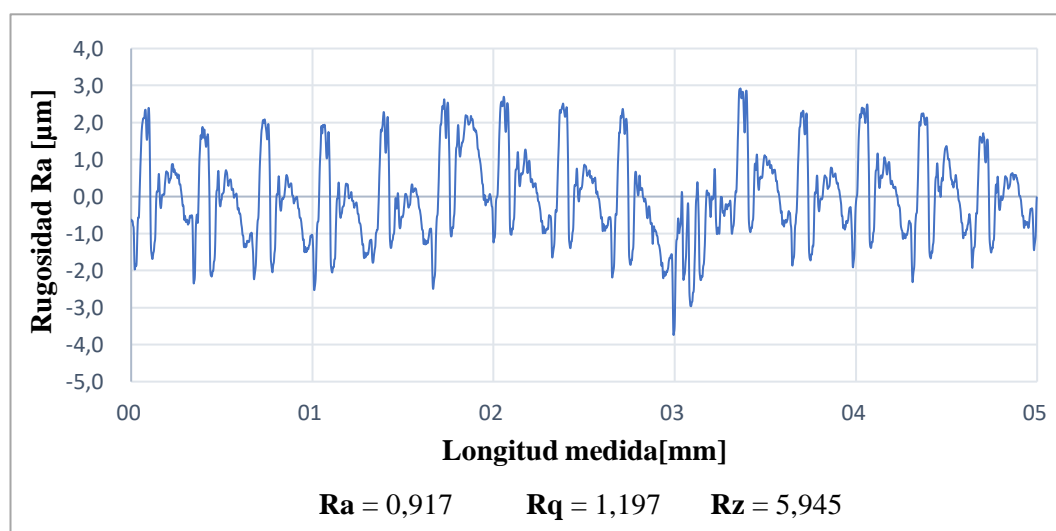


**Tabla 29.** Adecuados parámetros de mecanizado.

| <b>MQL (A)</b><br><b>[ml/h]</b> | <b>VC (B)</b><br><b>[m/min]</b> | <b>Fz (C)</b><br><b>[mm/diente]</b> | <b>Ra previsto (D)</b><br><b>[μm]</b> |
|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Aceite vegetal<br>50 [ml/h]     | 220                             | 0,05                                | 0,841                                 |

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

El resultado de la rugosidad media Ra encontrada, mecanizada usando los parámetros adecuados y medida sobre la superficie con el rugosímetro Mitutoyo SJ210 se muestran en la Figura 30.



**Figura 30.** Variación de la rugosidad dada por el instrumento de medición.

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

La rugosidad Ra obtiene un valor de 0,917 [μm], este resultado es la media dada por el rugosímetro entre el rango de los datos máximos y mínimos. El valor de rugosidad que predice la ecuación matemática antes calculada y mostrado en la tabla 29 es 0,841 [μm], por lo tanto, el error corresponde a un 8,2% respecto a la rugosidad verdadera dada por el rugosímetro en la Figura 30.

### **3.11. Intervalo de confianza**

El intervalo de confianza permite validar el proceso desarrollado en este estudio, usando para ello el porcentaje de error entre el valor de rugosidad medida y el valor de rugosidad calculada mediante fórmula matemática o rugosidad esperada. Este error debe ser mínimo para declarar que el presente estudio es útil y válido.

Por lo tanto, se debe verificar el rango en el que se desenvuelven los distintos valores de rugosidad media adecuados.

Mediante la Ecuación 20 se encuentra el intervalo de confianza (C.I.):

$$C.I. = \pm \sqrt{F(1, D_{ef}) \cdot Ve \left[ \frac{1}{neff} + \frac{1}{Rp} \right]} \quad (20)$$

De la Ecuación 9 se obtiene los grados de libertad del error ( $D_{ef}$ ) para este estudio:

$$D_{ef} = 18$$

Con un nivel de confianza del 95% de la Tabla 25 de Fisher se tiene:

$$F(1, D_{ef}) = F(1, 18) = 4,41$$

De la tabla 26 se obtiene la varianza del error ( $Ve$ ):

$$Ve = 0,040$$

El número de replicaciones ( $neff$ ) se calcula usando la ecuación 21:

$$neff = \frac{N}{1 + V_t} \quad (21)$$

Donde:

$N$ : Número de pruebas.

$V_t$ : Número de grados de libertad de los factores influyentes.

$Rp$ : Número de mediciones de las pruebas.

Luego, se calcula el intervalo de confianza C.I.:

$$C.I. = \pm \sqrt{4,41 \cdot (0,040) \cdot \left[ \frac{1}{27} + \frac{1}{3} \right]}$$

$$C.I. = \pm 0,300$$

Con la ecuación 22 se obtiene la rugosidad adecuada y óptima, según el método Taguchi.

$$R_{\text{óptima}} = W + X + Y - 3 \cdot R_{\text{mean}} . \quad (22)$$

Donde:

$W, X, Y$ : Valor menor medio de los niveles de cada parámetro de la Tabla 27

$R_{\text{mean}}$ : Media de rugosidad total de la Tabla 27.

Por lo tanto:

$$R_{\text{óptima}} = 1,065 + 1,014 + 1,080 - 31,23$$

$$R_{\text{óptima}} = 0,531 [\mu m]$$

De lo anterior, la rugosidad adecuada prevista y óptima en la superficie de la probeta es  $0,5 [\mu m]$ .

Para realizar la comprobación del experimento se debe sumar el valor de la rugosidad óptima calculada con el intervalo de confianza, esto significa  $0,831 [\mu m]$ , luego se debe comparar con el valor de la mejor rugosidad encontrada en los ensayos que se muestra en la Tabla 30, en la cual, la menor rugosidad se obtiene en el experimento 25 que alcanza el valor de  $0,856 [\mu m]$ .

**Tabla 30.** Valor de rugosidad menor del estudio

| <b>No<br/>Ensayo</b> | <b>MQL</b>  | <b>VC<br/>[m/min]</b> | <b>fz<br/>[mm/diente]</b> | <b>Rugosidad Ra<br/>[μm]</b> |
|----------------------|-------------|-----------------------|---------------------------|------------------------------|
| 25                   | Oliva 50 MI | 220                   | 0,05                      | 0,856                        |

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

Finalmente, la validez del estudio está asegurado puesto que la suma del valor de la rugosidad óptima calculada y el intervalo de confianza alcanzan un valor de 0,831 [μm] por lo tanto, los resultados del presente estudio se encuentran muy cerca de los valores óptimos calculados.

### 3.12. Costos

En el desarrollo del presente estudio se han generado varios costos, los mismos que se han clasificado en costos directos por materiales y herramientas, costos directos, por servicio de equipos y finalmente costos indirectos.

#### 3.12.1. Costos directos de materiales y herramientas

Corresponden al precio del material según la cantidad de ensayos realizados, en este estudio fueron 27 ensayos; además del costo de las herramientas utilizadas en el mecanizado. En la Tabla 31 se observan estos costos.

**Tabla 31.** Costo de materiales y herramientas

| <b>Material / Herramienta</b>  | <b>Cantidad</b> | <b>Costo<br/>unitario USD</b> | <b>Costo total<br/>USD</b> |
|--|-----------------|-------------------------------|----------------------------|
| Barras de Acero d50 x 100 mm AISI 4140   | 9               | 20                            | 180                        |
| Aceite Vegetal 500 ml  | 1               | 10                            | 10                         |
| Aceite de Corte Sintético 500 ml   | 1               | 15                            | 15                         |
| Fresa de carburo con revestimiento TiAlN, d10 x 70 mm para desbaste.             | 1               | 30                            | 30                         |
| Fresa punta redonda de carburo con revestimiento TiAlN, d14 x70 mm para acabado. | 1               | 240                           | 240                        |
|  |                 | <b>TOTAL</b>                  | <b>475</b>                 |

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

### 3.12.2. Costos directos de equipos y servicios

En la Tabla 32 se observan los costos por alquiler del centro CNC de mecanizado y rugosímetro Mitutoyo para medir la rugosidad Ra, sin embargo, se debe indicar que estos costos son aproximados aparentes, puesto que, tanto el centro de mecanizado y el instrumento de medida de rugosidad Mitutoyo pertenecen a la Universidad Politécnica Salesiana, misma que presta de manera gratuita estos servicios para aquellos estudiantes que realizan estudios netamente de investigación.

**Tabla 32.** Costos directos de equipos y servicios.

| <b>Equipos / Servicios</b>                    | <b>Número de horas</b> | <b>Costo hora USD</b> | <b>Costo total USD</b> |
|---|------------------------|-----------------------|------------------------|
| Centro de Mecanizado CNC                      | 15                     | 30                    | 450                    |
| Instrumento de medición de rugosidad Mitutoyo | 8                      | 5                     | 40                     |
|   |                        | <b>TOTAL</b>          | <b>490</b>             |

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

### 3.12.3. Costos indirectos

Estos costos son aquellos valores que corresponden a materiales y servicios utilizados de manera indirecta, pero que han sido necesarios para la realización del presente trabajo, no influyen de directamente en los ensayos, pero si en el costo total de esta investigación. Estos costos se presentan en la Tabla 33.

**Tabla 33.** Costos indirectos

| <b>Materiales y servicios</b> | <b>Costo total USD</b> |
|-------------------------------|------------------------|
| Asesoría externa              | 120                    |
| Transporte                    | 50                     |
| Impresiones y suministros     | 100                    |
| <b>TOTAL</b>                  | <b>270</b>             |

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

### 3.12.4. Costos totales

Los costos totales corresponden a la suma total de los costos anteriores, es decir, a los costos directos y costos indirectos. Estos costos se muestran a continuación en la Tabla 34.

**Tabla 34.** Costo total del estudio

| <b>Descripción</b>                           | <b>Valor total USD</b> |
|--|------------------------|
| Costos directos de materiales y herramientas | 475                    |
| Costos directos de equipos y servicios       | 490                    |
| Costos indirectos                            | 270                    |
| <b>TOTAL</b>                                 | <b>1.235</b>           |

Elaborado por: Francisco Calle & Jefferson Valencia

## CONCLUSIONES

- La mejor calidad o rugosidad superficial tiene un valor de 0,856 [ $\mu\text{m}$ ], al combinar en el mecanizado los parámetros de velocidad de corte de 220 [m/min], el avance por diente de 0,05 [mm/diente] y aceite vegetal en el sistema MQL con flujo volumétrico de 50 [ml/h].
- Los valores de rugosidad obtenidos en los 27 ensayos se encuentran entre 0,856 [ $\mu\text{m}$ ] y 1.876 [ $\mu\text{m}$ ], por lo tanto, basándose en la norma DIN 4768 que clasifica las clases de rugosidades de acuerdo con un rango de valores de Ra, el presente estudio en su totalidad presenta una clase de rugosidad N6, con esto se demuestra que se puede usar tanto aceite vegetal como aceite sintético como fluido de corte en operaciones de fresado CNC del acero AISI 4140.
- Mediante el análisis ANOVA, como se presentó en la Tabla 26, se encuentra a la velocidad de corte ( $V_c$ ) como el factor más influyente de este estudio, con un 36,3% seguido del avance por diente ( $f_z$ ) con un 27,3% y finalmente el factor, aunque con menor influencia, pero de esencial importancia en el proceso, es el sistema MQL con un 3,4%.
- En el sistema MQL mostrado en la tabla 17, el uso de aceite vegetal con un flujo volumétrico de [50 ml/h], mejora la rugosidad ( $R_a$ ) en un 9% respecto al uso de aceite sintético con flujo de 50 [ml/h] y en un 10% respecto al uso de aceite vegetal con flujo de 25 [ml/h].
- La velocidad de corte de 220 [m/min] presentada en la tabla 19, permite obtener la mejor calidad superficial y además disminuye un 29% la rugosidad respecto a la variación de 180 [m/min] y un 16 % en relación con la velocidad de 200 [m/min].
- El mejor valor de rugosidad se obtiene con un avance de 0,05 [mm/diente] presentado en la tabla 21, esto demuestra una mejora entre 6 y 24% con relación a los avances de 0,1 y 0,15 [mm/diente] respectivamente.

- Al usar el aceite vegetal como fluido de trabajo, se reduce en gran medida el impacto medio ambiental ya que es un fluido biodegradable y no resulta tóxico para el operario.

## **RECOMENDACIONES**

- Realizar una investigación sobre el desgaste causado en la herramienta en operaciones de fresado - acabado CNC 3D, con el uso de aceite vegetal y sintético en el sistema MQL para el acero AISI 4140.



- Estudiar los efectos que causaría el aceite vegetal usando un sistema distinto al MQL respecto al uso de otros lubricantes refrigerantes, con materiales diferentes al acero AISI 4140, en procesos de fresado 3D.
- Implementar el uso del aceite vegetal en futuras investigaciones como un lubricante refrigerante alternativo en procesos industriales de mecanizado con la finalidad de aprovechar sus características favorables en la salud y el medio ambiente.
- Realizar un análisis comparativo con diferentes tipos de aceros con las mismas condiciones y variables realizadas en esta investigación de manera que se pueda verificar que existe similitud en la rugosidad en distintos materiales.
- Al usar el sistema MQL, se recomienda el uso de aceite vegetal, ya que se comprobó al mecanizar que la neblina que producía en este sistema con dicho aceite no perjudicará en su mayoría la salud del operario.

## REFERENCIAS

- [1] A. Jayal, F. Badurdeen, O. Dillon Jr. y I. Jawahir, «Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product.,» *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 2, n° 3, pp. 144-152, 2010.
- [2] M. Hadad y B. Sadeghi, «Minimum quantity lubrication-MQL turning of AISI 4140 steel alloy,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 54, pp. 332-343, 2013.
- [3] Chetan, S. Ghosh y P. Venkateswara Rao, «Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review.,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 100, pp. 17-34, 2015.
- [4] A. S. Araújo Junior, W. Falco Sales, R. Batista da Silva, E. Silva Costa y Á. Rocha Machado, «Lubri-cooling and tribological behavior of vegetable oils during milling of AISI 1045 steel focusing on sustainable manufacturing,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 156, pp. 635-647, 2017.
- [5] M. Muaz y S. K. Choudhury, «Experimental investigations and multi-objective optimization of MQL-assisted milling process for finishing of AISI 4340 steel,» *Measurement*, vol. 138, p. 557–569, 2019.
- [6] SKF Group, «SKF,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.skf.com/binary/96-32233/0901d19680126cc5-1-5102-EN.pdf>. [Último acceso: 10 11 2019].
- [7] C. G. Martínez, «Universidad Carlos III de Madrid,» 06 2010. [En línea]. Available: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/9659>. [Último acceso: 10 11 2019].
- [8] D. Alvero Bermejo, D. Salcedo Pérez y J. P. Fuentes Bonel, «upna campus iberus,» 07 2015. [En línea]. Available: <http://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/19350/Diego%20Alvero-%20Green%20Handle.pdf?sequence=1>. [Último acceso: 10 11 2019].
- [9] Y. LI, «Evolution Negocio y Tecnología SKF,» 30 Octubre 2017. [En línea]. Available: <http://evolution.skf.com/es/la-lubricacion-por-cantidades-minimas-reduce-el-coste-total-de-propiedad/>.

- [10] TRICO, «SEALCO Sellado de Fluidos,» 2015. [En línea]. Available: [http://www.cisealco.com/catalogos/sistemas-de-lubricacion-trico\\_2019.pdf](http://www.cisealco.com/catalogos/sistemas-de-lubricacion-trico_2019.pdf). [Último acceso: 14 11 2019].
- [11] Chem-Supply Pty Ltd, «Chem-Supply,» Commerce Vison, 2019. [En línea]. Available: <https://www.chemsupply.com.au/laboratory-reagents>. [Último acceso: 14 11 2019].
- [12] Renewable Lubricants Inc., «RENEWABLE LUBRICANTS,» Lansing Web Desing, 2019. [En línea]. Available: <https://renewablelube.com/>. [Último acceso: 14 11 2019].
- [13] J. Uhlarz, «Accu-Lube Manufacturing GmbH,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.accu-lube.com/en/products/lubricants/>. [Último acceso: 14 11 2019].
- [14] CHEM-SUPPLY PTY LTD, «OLIVE OIL Cold Pressed TG,» Chem-Supply Pty Ltd, Port Adelaide Enfield, 2017.
- [15] Total Chile, «TOTAL,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.total-chile.cl/tips/aceite-sintetico/que-es-el-aceite-sintetico>. [Último acceso: 20 11 2019].
- [16] Würth, «Würth Uruguay,» Agile Works, 2019. [En línea]. Available: <https://www.wurth.com.uy/fluido-de-corte-multi-wfc>. [Último acceso: 15 11 2019].
- [17] WÜRTH, «WÜRTH,» 12 2017. [En línea]. Available: <https://www.wurth.com.uy/Attachment/DownloadFile?downloadId=3056>. [Último acceso: 15 11 2019].
- [18] Perez Camps, «PEREZCAMPS,» [En línea]. Available: <https://www.perezcamps.com/es/fresadoras-cnc-y-maquinas-letras-corporeas>. [Último acceso: 15 11 2019].
- [19] Festo Didactic Inc., «Festo,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.festo-didactic.com/mx-es/learning-systems/emco-cnc/maquinas-emco-cnc/fresadora-concept-mill-250.htm?fbid=bXguZXMuNTY0LjE0LjE4LjExOTcuNjk0Mw>. [Último acceso: 16 11 2019].
- [20] M. P. Groover, Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2010.

- [21] SANDVIK Coromant, «Sandvik Coromant,» [En línea]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/pages/default.aspx>. [Último acceso: 17 11 2019].
- [22] F. Nicolalde Subía y M. Tutillo Oña, «Análisis comparativo del acabado superficial en aleación de aluminio 7075-t6 para un proceso de mecanizado cnc entre un sistema de lubricación de,» Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2019.
- [23] Sandvik Coromant, «SANDVIK Coromant,» [En línea]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx>. [Último acceso: 19 11 2019].
- [24] A. V. Coque Paucarima, «Análisis del desgaste por filo de aportación en herramientas de mecanizado para el aluminio AA 7075-T6 (Prodax) en el proceso de fresado plano en un centro de mecanizado,» ESPE, Sangolquí, 2018.
- [25] Sandvik Coromant, «SANDVIK Coromant,» [En línea]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/pages/entering-angle-and-chip-thickness.aspx>. [Último acceso: 18 11 2019].
- [26] Marenals, «Marena,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.marena.es/catalogo.pdf>. [Último acceso: 23 11 2019].
- [27] Juan Martín, «Canales Sectoriales Interempresas,» 16 11 2002. [En línea]. Available: <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/26035-Parametros-y-condiciones-de-corte-en-MAV.html>. [Último acceso: 23 11 2019].
- [28] AUTODESK. Help, «AUTODESK,» 11 10 2018. [En línea]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/es/support/featurecam/getting-started/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ESP/FCAM/files/GUID-49556E8A-5BE9-4A77-A210-4C66ABA8A90A-htm.html>. [Último acceso: 01 12 2019].
- [29] Tebís, «Tebís LOS EXPERTOS EN CAD/CAM,» 2019. [En línea]. Available: <https://int.tebis.com/es/es/cam/fresado-25d-de-superficies-planas-contornos-y-ciegos/>. [Último acceso: 02 12 2019].
- [30] AUTODESK. Help, «AUTODESK,» 19 08 2019. [En línea]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/es/support/featurecam/getting-started/caas/CloudHelp/cloudhelp/2020/ESP/FCAM/files/GUID-3C2A7F89-80C1-4DA9-B8B8-C7D8E3D41A4C-htm.html>. [Último acceso: 01 12 2019].

- [31] AUTODESK.HELP, «AUTODESK.,» 20 02 2019. [En línea]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/es/support/powermill/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ESP/PWRM-ReferenceHelp/files/GUID-F4C152A4-900F-4E22-A4F9-7EEC5AC62586-htm.html>. [Último acceso: 01 12 2019].
- [32] AUTODESK.Help, «AUTODESK.,» 1 10 2018. [En línea]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/es/support/featurecam-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ESP/FCAM/files/GUID-6122477C-AF88-4C92-8664-C0542AE7747D-htm.html>. [Último acceso: 01 12 2019].
- [33] AZoM, «AZOMaterials,» AZoNetwork, 13 09 2012. [En línea]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6769>. [Último acceso: 10 11 2019].
- [34] IVAN BOHMAN C.A., «IVAN BOHMAN C.A.,» IVAN BOHMAN C.A., 02 2016. [En línea]. Available: <https://www.ivanbohman.com.ec>. [Último acceso: 10 11 2019].
- [35] SISA, «Aceros SISA,» Aceros SISA-MET, 2012. [En línea]. Available: <http://sisal.com.mx/wp-content/uploads/Acero-SISA-4140T-Tratado-y-Revenido.pdf>. [Último acceso: 11 11 2019].
- [36] IVAN BOHMAN C.A., «IBCA,» 20 Septiembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.ivanbohman.com.ec/product-detail/709-42-crmo4-aisi-4140/>.
- [37] SACK, «SACK Pasión por el servicio,» Sack, 2014. [En línea]. Available: [www.sack.cl](http://www.sack.cl). [Último acceso: 12 11 2019].
- [38] WALTER, «WALTER,» [En línea]. Available: [https://www.walter-tools.com/es-es/tools/standard\\_products/milling/overview/shoulder\\_milling/protostar\\_n\\_50/Pages/default.aspx](https://www.walter-tools.com/es-es/tools/standard_products/milling/overview/shoulder_milling/protostar_n_50/Pages/default.aspx). [Último acceso: 22 11 2019].
- [39] SANDVIK Coromant, «Fresado,» de *Technical Guide - Milling*, Suecia, Sandvik Group, 2019, pp. 77-78.
- [40] GUHRING, «GUHRING,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.guhring.com/ProductsServices/SizeDetails?EDP=9037270140000>. [Último acceso: 01 12 2019].
- [41] GUHRING, «Velocidades y Feeds,» GUHRING Inc., Wisconsin, 2019.

- [42] N. Liu, S. B. Wang, Y. F. Zhang y W. F. Lu, «A novel approach to predicting surface roughness based on specific cutting energy consumption when slot milling Al-7075,» *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 118, pp. 13-20, 2016.
- [43] S. Kalpakjian, *Manufactura, ingeniería y tecnología*, México: PEARSON EDUCACIÓN, 2008.
- [44] M. López de Lacalle, M. Laikiz y G. S, *Mecanizado de alto rendimiento*, Bilbao: Izaro, Ed. (1st ed.), 2004.
- [45] Ó. Egyetem, «Study of z-level finishing milling strategy,» *Development in Machining Technology*, p. 83–90, 2014.
- [46] E. Baró Gadea, «Estudio de la rugosidad superficial mediante fresado,» Universidad Politecnica de Cataluña, Barcelona, 2012.
- [47] MITUTOYO., «QUICK GUIDE TO SURFACE,» MITUTOYO., Korea, 2016.
- [48] J. Zhang, J. Chen y D. Kirby, «Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method,» *Journal of materials processing technology*, vol. 184, pp. 233-239, 2017.
- [49] A. Murat, «Optimization of process parameters with minimum surface roughness in the pocket machining of AA5083 Aluminium alloy via taguchi method,» 2013.
- [50] H. G. Pulido y R. d. I. V. Salazar, *Análisis y Diseño de Experimentos*, México DF: McGraw Hill, 2012.
- [51] R. R. S. y P. G., «Application of Taguchi methods and ANOVA in optimization of process parameters for metal removal rate in electrochemical machining of Al/5%SiC composites,» *International Journal of Engineering Research* , vol. 2, nº 3, pp. 192 - 197, 2012.
- [52] M. F. Triola, *Estadística*, México DF: Pearson, 2009.
- [53] M. Riquelme, «WEB y Empresas,» 30 10 2019. [En línea]. Available: <https://www.webyempresas.com/varianza/>. [Último acceso: 04 12 2019].
- [54] P. Fernández, «Tablas Estadísticas,» Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, 2007.
- [55] C. G. Martínez, *Optimización del Proceso de Tallado por Generación Mediante Sistema MQL (Lubricación por Cantidades Mínimas)*, Madrid, 2010.

- [56] WÜRTH, «FLUIDO DE CORTE MULTI - WFC,» Würth Uruguay, Canelones, 2017.
- [57] IVAN BOHMAN C.A., « IVAN BOHMAN C.A.,» IVAN BOHMAN C.A., 02 2016. [En línea]. Available: <https://www.ivanbohman.com.ec/wp-content/uploads/2016/02/709.pdf>. [Último acceso: 10 11 2019].
- [58] F. S. Nicolalde Subía y M. A. Tutillo Oña, «Análisis comparativo del acabado superficial en aleación de aluminio 7075-t6 para un proceso de mecanizado cnc entre un sistema de lubricación de,» Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2019.
- [59] AUTODESK. Ayuda, «AUTODESK,» 11 12 2019. [En línea]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/search-result/caas/CloudHelp/cloudhelp/ENU/Fusion-CAM/files/GUID77067110-3D88-4DA7-B171-6B27F04CF8B3-htm.html>. [Último acceso: 14 12 2019].
- [60] METALIUM, «METALIUM,» 2013. [En línea]. Available: <https://metalium.mx/acero-4140>. [Último acceso: 10 11 2019].